



**TUGAS AKHIR TF 141581**

**PERANCANGAN *WET SCRUBBER* SEBAGAI UNIT  
PENGURANG KADAR  $H_2S$  PADA PRODUKSI  
BIOGAS DI PT ENERO MOJOKERTO**

**VINCENSIUS CAHYA DWINANDA  
NRP 2412 100 034**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**



***FINAL PROJECT TF 141581***

***DESIGN OF WET SCRUBBER AS H<sub>2</sub>S CONTENT  
REDUCTOR UNIT IN BIOGAS PRODUCTION AT PT  
ENERO MOJOKERTO***

***VINCENSIUS CAHYA DWINANDA  
NRP 2412 100 034***

***Supervisor  
Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA***

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017***

## **LEMBAR PENGESAHAN**

### **PERANCANGAN *WET SCRUBBER* SEBAGAI UNIT PENGURANG KADAR $H_2S$ PADA PRODUKSI BIOGAS DI PT ENERO MOJOKERTO**

Oleh :

**Vincensius Cahya Dwinanda**

**NRP. 2412 100 034**

**Surabaya, Januari 2017**

**Mengetahui/Menyetujui**

**Pembimbing**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA**

**NIP. 19650309 199002 1 001**

**Ketua Jurusan  
Teknik Fisika FTI – ITS**



**Agus Muhammad Hatta, ST, MSi, Ph.D**

**NIP. 19780902 200312 1 002**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN *WET SCRUBBER* SEBAGAI UNIT PENGURANG KADAR $H_2S$ PADA PRODUKSI BIOGAS DI PT ENERO MOJOKERTO





#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol  
Program Studi S – 1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**VINCENSIUS CAHYA DWINANDA**  
**NRP. 2412 100 034**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- |   |                                     |   |               |
|---|-------------------------------------|---|---------------|
| 1 | Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA      |    | Pembimbing    |
| 2 | Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT |   | Ketua Penguji |
| 3 | Totok Ruki Biyanto, ST, MT, Ph.D    |  | Penguji I     |
| 4 | Dyah Sawitri, ST, MT                |  | Penguji II    |

SURABAYA  
Januari 2017

# **PERANCANGAN *WET SCRUBBER* SEBAGAI UNIT PENGURANG KADAR $H_2S$ PADA PRODUKSI BIOGAS DI PT ENERO MOJOKERTO**

**Nama Mahasiswa** : Vincensius Cahya Dwinanda  
**NRP** : 2412 100 034  
**Jurusan** : Teknik Fisika  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

## **Abstrak**

PT Energi Agro Nusantara (Enero) mengalami kelebihan produksi biogas akibat terjadinya fermentasi limbah cair yang terbentuk di *lagoon*. Biogas yang terbentuk di *lagoon* cukup banyak dan dapat dimanfaatkan kembali, namun kadar  $H_2S$  yang tinggi menyebabkan perlunya pemurnian terhadap  $H_2S$ . Pada penelitian ini dirancang unit pengurang kadar  $H_2S$  pada produksi biogas di PT Enero, dimana metode yang digunakan adalah dengan memanfaatkan kelarutan  $H_2S$  yang tinggi dalam air. Unit yang menggunakan pelarut air dalam menghilangkan kandungan gas tertentu disebut sebagai *wet scrubber*. Analisis dilakukan terhadap dua jenis *wet scrubber* yang akan dirancang yaitu kolom *tray* dan *packed*. Melalui penelitian ini diketahui bahwa kolom *packed* memiliki kinerja terbaik, yaitu air yang dibutuhkan paling sedikit dan kadar  $H_2S$  keluaran kolom juga memenuhi target sebesar 4 ppm. Spesifikasi kolom *packed* yang dirancang adalah: jenis *packing* Intalox Structured Packing, diameter 1,5 m, tinggi 10 m, dan laju air minimum 179,99 m<sup>3</sup>/jam. Perubahan laju alir biogas akibat fluktuasi produksi biogas di lapangan mempengaruhi kinerja *wet scrubber*. Perubahan laju alir yang semakin besar mengakibatkan kadar  $H_2S$  pada gas keluaran *wet scrubber* meningkat. Peningkatan kadar  $H_2S$  bisa diatasi dengan meningkatkan laju air minimum yang masuk.

**Kata kunci** : kadar  $H_2S$ , air, *wet scrubber*, *tray*, *packed*, laju alir biogas, laju air minimum

**DESIGN OF WET SCRUBBER AS H<sub>2</sub>S CONTENT  
REDUCTOR UNIT IN BIOGAS PRODUCTION  
AT PT ENERO MOJOKERTO**

**Name** : Vincensius Cahya Dwinanda  
**Student Number** : 2412 100 034  
**Department** : Engineering Physics  
**Supervisor** : Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

**Abstract**

*PT Energi Agro Nusantara has encountered an excess of biogas production due to fermentation of waste water in the lagoon. Biogas that formed in the lagoon is quite a lot and can be reused, but high levels of H<sub>2</sub>S causing the need for purification of H<sub>2</sub>S. In this study is designed H<sub>2</sub>S reductor unit in biogas production at PT Enero, where the method is to utilize the high solubility of H<sub>2</sub>S in water. Units that use water as solvents in removing certain gas content called wet scrubber. Analysis is conducted on the two types of wet scrubber, tray and packed columns. Through this research, packed column has the best performance, the need of water is the least and H<sub>2</sub>S content at column output also meet its target of 4 ppm. Specifications of designed packed column is: type of packing Intalox Structured Packing, diameter 1,5 m, height 10 m, and the minimum water rate is 179,99 m<sup>3</sup>/h. Changes in biogas flow rate due to biogas production fluctuation in the field affect the wet scrubber performance. The greater biogas flow rate resulting H<sub>2</sub>S content in gas output of wet scrubber increased. Increased contents of H<sub>2</sub>S can be overcome by increasing the minimum rate of water intake.*

**Keywords** : H<sub>2</sub>S content, water, wet scrubber, tray, packed, biogas flow rate, minimum water rate

## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas segala limpahan rahmat, rezeki, kesehatan, keselamatan, dan ilmu yang Tuhan Yang Maha Esa berikan kepada penulis hingga mampu menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul :

### **PERANCANGAN *WET SCRUBBER* SEBAGAI UNIT PENGURANG KADAR $H_2S$ PADA PRODUKSI BIOGAS DI PT ENERO MOJOKERTO**

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, tidak terlepas dari semua pihak yang turut membantu baik moril maupun materil. Untuk itu penulis hendak mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS
2. Orang tua saya, Yustinus Agus Prihantoro dan Yulitta Ernawati, serta saudara-saudara saya, Bayu dan Dimas yang selalu berdoa untuk kebaikan saya.
3. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku dosen pembimbing yang dengan sabar membimbing, memberikan saran dan kritiknya.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, MSc selaku dosen wali yang memberi motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Fisika.
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmunya dengan ikhlas sehingga penulis dapat menyelesaikan kuliah sampai tugas akhir ini.
6. Bapak Alfian dan Bapak Farid, selaku insinyur PT Enero yang sekaligus sebagai pembimbing lapangan yang telah membimbing dan memfasilitasi selama pengambilan data lapangan.
7. Teman – teman Teknik Fisika Angkatan 2012, terutama Agung, Hanafi, Dion, Asrori, Panji, Kukuh, Fauji, Nizam, Alfian, Imil dan sahabat yang senantiasa memberikan semangat dan motivasinya.

8. Teman-teman asisten Laboratorium Rekayasa Bahan atas dukungan dan persahabatan selama perkuliahan.

Penulis sangat menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan untuk menyempurnakan laporan Tugas Akhir ini. Salam Satu Bendera.. Vivat TF!

Surabaya, Januari 2017  
Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Bahan Baku Proses Produksi Biogas dan Etanol di PT Enero	5
2.2 Proses Produksi Biogas dan Etanol di PT Enero	5
2.3 Karakteristik dan Komposisi Biogas Hasil Produksi PT Enero	9
2.4 Absorpsi	10
2.5 <i>Driving Force</i>	11
2.6 <i>Wet Scrubber</i>	11
2.6.1 Kesetimbangan Material <i>Wet Scrubber</i>	12
2.6.2 <i>Minimum Liq-Gas Ratio</i>	14
2.6.3 Jenis <i>Wet Scrubber</i>	15
2.6.4 Kolom/Menara Pelat ( <i>Plate/Tray Column</i> )	16
2.5.5 Kolom/Menara Pak ( <i>Packed Column</i> )	18
2.7 Mekanisme Absorpsi <i>Wet Scrubber</i>	22
2.7.1 Laju Transfer Massa Kolom <i>Tray</i>	23
2.7.2 Laju Transfer Massa Kolom <i>Packed</i>	24
2.8 <i>Pressure Drop</i>	25
2.9 <i>Software Aspen Plus</i>	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29

3.1	Alur Penelitian	29
3.2	Pengambilan Data Operasional dan <i>Properties</i>	31
3.3	Perancangan <i>Wet Scrubber</i>	32
3.3.1	Perancangan <i>Wet Scrubber</i> Jenis Kolom <i>Tray</i>	32
3.3.2	Perancangan <i>Wet Scrubber</i> Jenis Kolom <i>Packed</i>	38
3.4	Perancangan <i>Wet Scrubber</i> di <i>Software Aspen Plus</i>	41
3.5	Analisis Kinerja <i>Wet Scrubber</i> Hasil Rancangan	47
BAB IV	ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1	Analisis Kinerja <i>Wet Scrubber</i> dengan Laju Alir Biogas Tetap	49
4.1.1	Struktur Bangun <i>Wet Scrubber</i> Kolom <i>Tray</i> dan <i>Packed</i> Hasil Perancangan	50
4.1.2	Kinerja <i>Wet Scrubber</i> Kolom <i>Tray</i> dan <i>Packed</i> Hasil Perancangan	50
4.1.3	Kinerja <i>Wet Scrubber</i> Kolom <i>Packed</i> Hasil Perancangan Ulang	54
4.2	Analisis Kinerja <i>Wet Scrubber</i> dengan Laju Alir Biogas yang Berubah	60
4.2.1	Pengaruh Perubahan Laju Alir Biogas terhadap Kemampuan Absorpsi $H_2S$ <i>Wet Scrubber</i>	60
4.2.2	Penyesuaian Laju Air Masukan <i>Wet Scrubber</i> terhadap Perubahan Laju Alir Biogas	61
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1	Kesimpulan	63
5.2	Saran	63
	DAFTAR PUSTAKA	65
	LAMPIRAN	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Diagram Alir Proses Produksi Biogas dan Etanol	6
<b>Gambar 2.2</b>	Diagram Alir Pengolahan Limbah PT Enero	8
<b>Gambar 2.3</b>	Mekanisme Transfer Massa	11
<b>Gambar 2.4</b>	Skema Kolom <i>Wet Scrubber Countercurrent</i>	12
<b>Gambar 2.5</b>	Garis Operasi dan Ekulibrium dari Proses Absorpsi	13
<b>Gambar 2.6</b>	<i>Minimum Liq-Gas Ratio</i> dalam Proses Absorpsi	14
<b>Gambar 2.7</b>	Garis Operasi (OL) dan <i>Limiting Operation Line</i>	15
<b>Gambar 2.8</b>	<i>Plate/Tray Column</i>	16
<b>Gambar 2.9</b>	Skema Wet Scrubber dan OL dan VLE-Line pada Wet Scrubber	17
<b>Gambar 2.10</b>	Ilustrasi Input dan Output pada <i>Wet Scrubber</i>	18
<b>Gambar 2.11</b>	<i>Packed Column</i>	19
<b>Gambar 2.12</b>	<i>Random Packing</i>	20
<b>Gambar 2.13</b>	<i>Structured Packing</i>	20
<b>Gambar 2.14</b>	Tampilan Muka Aspen Plus	27
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir	30
<b>Gambar 3.2</b>	Desain <i>Wet Scrubber</i> Jenis Kolom <i>Tray</i>	33
<b>Gambar 3.3</b>	Desain <i>Wet Scrubber</i> Jenis Kolom <i>Packed</i>	38
<b>Gambar 3.4</b>	Jenis <i>Packing</i> : (a) Pall Ring (b) Intalox Structured Packing	40
<b>Gambar 3.5</b>	Desain Akhir <i>Wet Scrubber</i> Jenis Kolom <i>Tray</i>	42
<b>Gambar 3.6</b>	Desain Akhir <i>Wet Scrubber</i> Jenis Kolom <i>Packed</i>	43
<b>Gambar 3.7</b>	Komponen Proses Aspen Plus	44
<b>Gambar 3.8</b>	Penentuan <i>Henry Component</i>	44
<b>Gambar 3.9</b>	Penentuan <i>Property Method</i>	45
<b>Gambar 3.10</b>	Pemodelan <i>Wet Scrubber</i> di Aspen Plus	45
<b>Gambar 3.11</b>	Penentuan Spesifikasi <i>Material Stream</i>	46
<b>Gambar 3.12</b>	Penentuan Data Spesifikasi <i>Wet Scrubber</i>	46
<b>Gambar 3.13</b>	Penentuan Data Spesifikasi Kolom <i>Tray</i>	47
<b>Gambar 3.14</b>	Penentuan Data Spesifikasi Kolom <i>Packed</i>	47
<b>Gambar 4.1</b>	Profil Kadar $H_2S$ pada <i>Wet Scrubber</i> Hasil Perancangan	52

<b>Gambar 4.2</b>	Profil Efisiensi Penyerapan Biogas ke Air Kolom <i>Packed</i>	55
<b>Gambar 4.3</b>	Profil Komposisi Biogas Kolom Pall Ring (25 mm)	56
<b>Gambar 4.4</b>	Profil Komposisi Biogas Kolom Pall Ring (38 mm)	57
<b>Gambar 4.5</b>	Profil Komposisi Biogas Kolom Pall Ring (50 mm)	57
<b>Gambar 4.6</b>	Profil Komposisi Biogas Kolom Intalox Structured Packing	58
<b>Gambar 4.7</b>	Pengaruh Laju Alir Biogas terhadap Kadar H <sub>2</sub> S pada Gas Keluaran <i>Wet Scrubber</i>	61
<b>Gambar 4.8</b>	Penyesuaian Laju Air Masukan <i>Wet Scrubber</i> terhadap Perubahan Laju Alir Biogas	62

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Karakteristik Biogas Hasil Produksi PT Enero	9
<b>Tabel 2.2</b>	Komposisi Biogas PT Enero	9
<b>Tabel 2.3</b>	Perbandingan <i>Random</i> dan <i>Structured Packing</i>	20
<b>Tabel 3.1</b>	Rincian Data Operasional dan <i>Properties</i> Biogas PT Enero dan Pelarut yang Digunakan (Air)	32
<b>Tabel 3.2</b>	Komposisi Biogas PT Enero	32
<b>Tabel 3.3</b>	Spesifikasi <i>Packing</i>	40
<b>Tabel 3.4</b>	Nilai HETP <i>Packing</i>	41
<b>Tabel 3.5</b>	Tinggi Kolom <i>Packed</i>	41
<b>Tabel 4.1</b>	Spesifikasi <i>Packing</i> pada <i>Wet Scrubber</i> Jenis <i>Packed</i>	49
<b>Tabel 4.2</b>	Struktur Bangun Kolom <i>Tray</i> dan <i>Packed</i> Hasil Perancangan	50
<b>Tabel 4.3</b>	Nilai <i>Pressure Drop</i> pada Gas Keluaran Kolom <i>Tray</i> dan <i>Packed</i> Hasil Perancangan	51
<b>Tabel 4.4</b>	Kadar H <sub>2</sub> S pada Gas Keluaran Kolom Hasil Perancangan	53
<b>Tabel 4.5</b>	Karakteristik Kinerja Kolom <i>Packed</i> Hasil Perancangan Ulang	59

*Halaman ini memang dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PT Energi Agro Nusantara (Enero) adalah salah satu perusahaan yang bergerak di bidang energi terbarukan, dimana perusahaan ini memproduksi bioethanol dan biogas yang merupakan hasil pengolahan kembali limbah industri gula PTPN X Gempolkerep Mojokerto. Kedua produk tersebut didapat melalui proses fermentasi limbah tetes gula, dimana bioethanol merupakan produk utama yang dihasilkan sedangkan biogas dihasilkan melalui proses fermentasi kembali dari limbah hasil pembuatan bioethanol. Biogas yang terbentuk digunakan oleh PT Medco Energy untuk pembangkit listrik, akan tetapi pada kondisi di lapangan biogas juga terbentuk pada *lagoon* yaitu tempat penampungan limbah cair hasil pembentukan biogas. Hal ini terjadi sebab dalam proses distribusi ke *lagoon* ikut terbawa mikroorganisme, sehingga limbah tersebut mengalami fermentasi dan menyebabkan terbentuknya biogas. Biogas yang terbentuk di lagoon tersebut memiliki kadar  $H_2S$  yang tinggi sehingga harus diantisipasi agar tidak mencemari lingkungan, dengan cara dibuang ke kolam air.

Berdasarkan data dan pengamatan pada *lagoon*, biogas dalam *lagoon* tersebut cukup banyak, sehingga apabila dibuang tidak ekonomis mengingat biogas ini tersusun sebagian besar atas metana (56,73% v/v) yang dapat digunakan dalam berbagai keperluan. Akan tetapi yang menjadi persoalan adalah adanya kandungan  $H_2S$  yang cukup tinggi yaitu sebesar 0,62% v/v atau 6200 ppm. Kandungan  $H_2S$  yang tinggi sangat berbahaya bagi manusia, selain itu juga dapat menyebabkan korosi pada peralatan di industri (Ghanbarabadi & Khoshandam, 2015). Standar aman kandungan  $H_2S$  dalam gas adalah sebesar 4 ppm (5,7 mg/m<sup>3</sup>) (Muhammad & GadelHak, 2014), sehingga apabila biogas ini akan dimanfaatkan kembali diperlukan mekanisme pemurnian biogas terhadap kandungan  $H_2S$  hingga mencapai kadar maksimum sebesar 4 ppm. Terdapat beberapa metode dalam penghilangan

kadar  $\text{H}_2\text{S}$ , salah satunya dengan memanfaatkan kelarutan  $\text{H}_2\text{S}$  yang tinggi dalam air (Lien dkk, 2014). Kelarutan  $\text{H}_2\text{S}$  yang tinggi menyebabkan  $\text{H}_2\text{S}$  akan terserap (*absorp*) dalam air, dimana kelarutannya sebesar  $1,85 \cdot 10^{-3}$  mol  $\text{H}_2\text{S}$ /mol air (Fogg & Young, 1988) lebih besar dibanding dengan kelarutan gas hidrokarbon semisal metana yang sebesar  $2,552 \cdot 10^{-5}$  mol  $\text{CH}_4$ /mol air (Clever & Young, 1987). Unit pengurang kadar  $\text{H}_2\text{S}$  dengan pelarut air ini sering disebut sebagai *wet scrubber*, dimana banyak dipergunakan sebab lebih murah dibandingkan dengan metode lain yang membutuhkan *equipment* yang rumit dan biaya operasional yang tinggi.

Kolom *tray* dan kolom *packed* adalah dua jenis *wet scrubber* yang banyak digunakan sebab struktur kedua kolom tersebut efisien dalam proses absorpsi gas. Kolom *tray* dan *packed* sendiri pada dasarnya adalah kolom vertikal dimana terdapat dua masukan yaitu air dan gas. Air masuk ke kolom melalui bagian atas kolom sedangkan gas masuk melalui bagian bawah kolom, kontak antara air dan gas terjadi melalui mekanisme *counter current*, dimana air akan menuju ke bawah sedangkan gas akan menuju ke atas, pada saat pertemuan tersebut  $\text{H}_2\text{S}$  akan terserap oleh air dan membebaskan gas ke keluaran kolom yang terdapat di bagian atas. Perbedaan kedua jenis kolom tersebut terletak pada mekanisme kontak antara gas dan air, pada kolom *tray* air dan gas bertemu secara bertingkat melalui pelat / *tray* yang terletak di sepanjang kolom sedangkan pada kolom *packed*, kontak antara gas dan air terjadi pada sela-sela bahan pengisi (*packing*) yang berada di tengah kolom.

Proses produksi biogas di PT Enero terjadi fluktuasi laju alir gas antara  $150 \text{ m}^3/\text{jam}$  –  $250 \text{ m}^3/\text{jam}$  dengan laju gas rata-rata adalah sebesar  $200 \text{ m}^3/\text{jam}$ , hal ini disebabkan karena biogas yang diproduksi merupakan hasil fermentasi limbah sehingga sangat tergantung dari kondisi lingkungan di sekitar *plant*. Perbedaan kondisi lingkungan tersebut seperti misalnya kondisi suhu siang dan malam. Laju alir biogas yang berbeda ini akan mempengaruhi penyerapan gas oleh air, karena secara teori semakin banyak gas yang berkontak dengan air maka gas yang terserap juga akan



semakin banyak (Walt, 2011), namun gas yang keluar dari *wet scrubber* akan berbeda kadarnya apabila dibandingkan dengan gas pada kondisi normal.

Berdasarkan paparan di atas akan dirancang *wet scrubber* sebagai unit pengurang kadar  $H_2S$  pada produksi biogas di PT Enero Mojokerto. Karakteristik gas yang digunakan sebagai acuan adalah biogas hasil produksi PT Enero dengan kadar  $H_2S$  diupayakan mencapai 4 ppm. Jenis *wet scrubber* yang digunakan adalah kolom *tray* dan *packed* yang selanjutnya akan dianalisis manakah yang mempunyai kinerja terbaik, dengan parameter kinerja adalah kadar  $H_2S$  pada gas keluaran kolom. Fluktuasi yang terjadi pada laju alir biogas juga akan dikaji terhadap pengaruhnya pada proses absorpsi di *wet scrubber*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang muncul dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Apakah *wet scrubber* dapat mengurangi kadar  $H_2S$  pada gas keluaran hingga sebesar 4 ppm pada biogas yang diproduksi oleh PT Enero
2. Bagaimana pengaruh perubahan laju alir biogas terhadap proses absorpsi  $H_2S$  pada *wet scrubber*

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. *Wet scrubber* dirancang sesuai dengan kapasitas dan komposisi biogas yang diproduksi oleh PT Enero
2. *Wet scrubber* yang dirancang berjenis kolom *tray* dan *packing*
3. *Wet scrubber* hasil rancangan dianalisis menggunakan simulasi berbasis *software* Aspen Plus V8.4
4. Dalam desain *wet scrubber* tidak dirancang *water treatment* untuk air hasil pengolahan *wet scrubber*

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang *wet scrubber* untuk mengurangi kandungan  $\text{H}_2\text{S}$  pada gas keluaran hingga sebesar 4 ppm pada biogas yang diproduksi oleh PT Enero
2. Mengetahui pengaruh laju alir biogas terhadap proses absorpsi  $\text{H}_2\text{S}$  pada *wet scrubber*

### **1.5 Manfaat**

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah dengan dirancangnya *wet scrubber*, maka biogas yang di produksi oleh PT Enero dapat dimanfaatkan untuk peralatan tanpa ada efek samping seperti korosi.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi teori dasar yang melandasi alur berpikir dalam menyelesaikan permasalahan dan mencapai tujuan dari penelitian tugas akhir ini. Teori – teori tersebut mencakup hal – hal yang mendukung dan menjadi dasar rujukan dalam tugas akhir.

#### **2.1 Bahan Baku Proses Produksi Biogas dan Etanol di PT Enero**

Proses produksi biogas dan etanol di PT. Energi Agro Nusantara (ENERO) menggunakan 3 (tiga) jenis bahan yaitu :

a. *Molasses*

*Molasses* atau biasa dikenal dengan tetes merupakan hasil dari perusahaan PTPN X Gempolkerep Mojokerto. *Molasses* merupakan sejenis sirup yang merupakan sisa dari proses pengkristalan gula pasir. *Molasses* tidak dapat dikristalkan karena mengandung glukosa dan fruktosa yang sulit untuk dikristalkan. *Molasses* merupakan produk limbah dari industri gula dimana produk ini masih banyak mengandung gula dan asam – asam organik, sehingga merupakan bahan baku yang sangat baik untuk industri pembuatan etanol.

b. *Yeast* (Ragi)

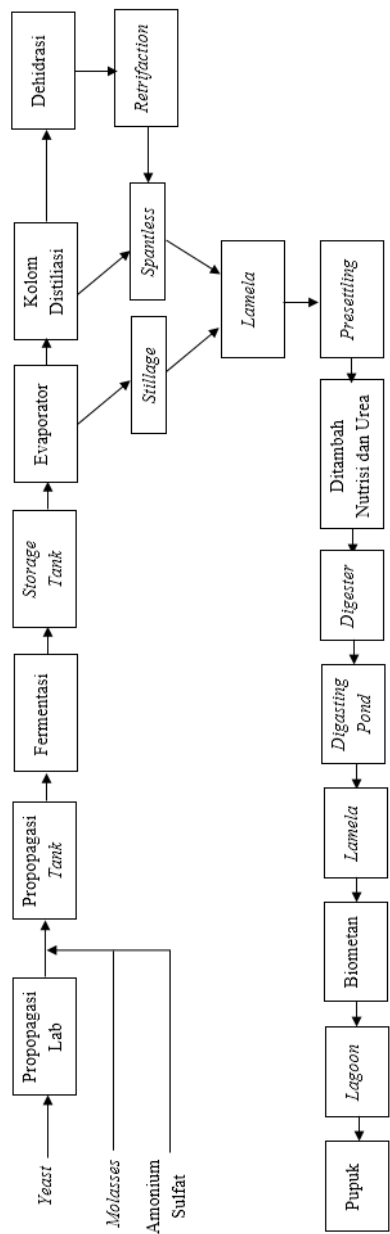
Ragi adalah salah satu tumbuhan bersel satu yang berkembang biak dengan cara pertunasan yang dapat menyebabkan terjadinya peragian. Peragian merupakan proses perubahan gelembung udara dan yang bukan gelembung udara (aerobik dan anaerobik) yang disebabkan oleh mikroorganisme.

c. Amonium Sulfat.

Ammonium Sulfat sebagai bahan pendukung yang berfungsi untuk menyediakan nutrisi bagi mikroorganisme yang merupakan mineral makro untuk perkembangan biakan *yeast*.

#### **2.2 Proses Produksi Biogas dan Etanol di PT Enero**

Proses produksi terdiri dari 2 proses utama yaitu proses fermentasi dan *refinery*. Proses produksi biogas dan etanol melalui beberapa tahap yang ditunjukkan pada gambar 2.1



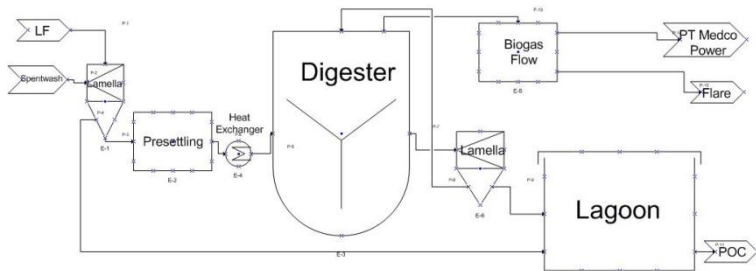
**Gambar 2.1** Diagram Alir Proses Produksi Biogas dan Etanol (PT Enero, 2016)

Fermentasi pada produksi biogas dan etanol adalah proses yang memanfaatkan mikroorganisme. Proses ini terdiri dari propagasi lab, propagasi tank, hingga pada penyimpanan etanol hasil fermentasi di *storage tank*. Pada propagasi lab terjadi perkembangan biakan *yeast* di lab. *Yeast* kemudian dimasukkan ke tanki yang berisi *molasses* dan bahan lainnya sehingga terjadi proses fermentasi yang akan menghasilkan etanol dari bahan-bahan tersebut.

Proses *refinery* terdiri dari evaporasi yang memisahkan *liquid* dengan etanol. Pada prinsipnya proses evaporasi merupakan proses dimana MBr (*Molasses Broth*) yang dihasilkan dari proses fermentasi dipanaskan sehingga air dan etanol menguap dan dapat terpisah dari MBr. Campuran uap air dan uap etanol kemudian dikondensasikan agar menjadi fase *liquid* kembali. Produk dari evaporator berupa kondensat etanol dan air memiliki kadar etanol sekitar 16 - 20 %. Suhu pada tangki evaporator 1 adalah 100°C, evaporator 2 adalah 85°C, evaporator 3 adalah 70°C, evaporator 4 adalah 55°C. Tahap selanjutnya dilakukan pemisahan lebih lanjut di kolom distilasi. Pada tahapan ini dilakukan pemisahan antara air dan etanol agar mendapatkan etanol dimana akan menghasilkan etanol dengan kadar sebesar 92%. Prinsip kerja dalam proses ini adalah pemisahan air dan etanol berdasarkan perbedaan titik didihnya pada tiap *tray*. Etanol akan menguap terlebih dahulu karena air memiliki titik didih yang lebih tinggi daripada etanol. Produk dari proses distilasi adalah uap etanol dengan konsentrasi sebesar 94% dan *spantless* (air dan sedikit etanol). Selanjutnya dilakukan proses dehidrasi yang bertujuan untuk menghilangkan kandungan air yang masih terikut dalam etanol hasil dari proses distilasi sehingga didapatkan konsentrasi etanol sebesar 99,5% dengan menggunakan dua tanki untuk adsorpsi (dengan zeolite) dan regenerasi.

Proses pengolahan limbah dinamakan proses WWTP (*Waste Water Treatment Proseses*). Limbah yang digunakan adalah berasal dari limbah evaporasi yang berupa *stillage* dan limbah kolom distilasi yang berupa *spantless*. Kedua jenis limbah tersebut ditampung pada *lamella* untuk dilakukan sedimentasi, dimana limbah *solid* dan *liquid* akan terpisah. Limbah *solid* akan mengalir

ke *lagoon*, sedangkan *liquid* mengalir ke *presettling*. Pada *presettling* ini limbah diberi nutrisi dan urea serta dilakukan pengaturan suhu limbah. Kemudian dari *presettling* limbah dialirkan ke *digester* sebagai tempat fermentasi untuk mengubah limbah cair menjadi biogas. Dari *digester* limbah dialirkan ke *digsting pond*, pada tahap ini aliran limbah diperlambat sehingga memungkinkan kandungan  $H_2S$  dan gas-gas lain menguap ke udara karena panas. Selanjutnya limbah mengalir ke *lamela* untuk dilakukan proses sedimentasi kembali, yakni dipisahkan antara *solid* dan *liquid*-nya. *Liquid* dialirkan ke pit biometan lalu ke *lagoon* untuk diolah menjadi pupuk organik cair, sedangkan *solid* yang diperkirakan masih mengandung banyak kandungan zat organik dialirkan kembali ke *digester* untuk *recycle* menghasilkan biogas.



**Gambar 2.2** Diagram Alir Pengolahan Limbah PT Enero  
(PT Enero, 2016)

Biogas yang dihasilkan dalam *digester* mengalir menuju pipa-pipa aliran gas menuju ke *sediment trap*, lalu ke penampungan gas PT. Medco untuk diolah menjadi biogas elektrik. Biogas yang melebihi *set point* penampungan gas akan dibakar oleh *flare*. Namun biogas tidak terbentuk hanya pada *digester*, pada *lagoon* juga ikut terbentuk biogas akibat terbawanya mikroorganisme. Adanya mikroba di *lagoon* menyebabkan terjadinya proses fermentasi dan terciptanya biogas. Biogas yang terbentuk di *lagoon* cukup banyak sehingga harus dibuang dengan cara dialirkan ke kolam air agar tidak mencemari lingkungan. Kandungan biogas di

lagoon tersusun sebagian besar atas metana (56,73% v/v) yang tentu dapat dimanfaatkan kembali. Namun yang menjadi persoalan adalah adanya kandungan  $\text{H}_2\text{S}$  yang cukup tinggi yaitu sebesar 0,62% v/v atau 6200 ppm pada biogas.

### 2.3 Karakteristik dan Komposisi Biogas Hasil Produksi PT Enero

Karakteristik dan komposisi biogas hasil produksi PT Enero ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 2.1** Karakteristik Biogas Hasil Produksi PT Enero

Notasi	Keterangan	Nilai dan Satuan
$P_{\text{gas}}$	Tekanan biogas	1,2 bar
$T_{\text{gas}}$	Suhu Biogas	47° C
$Q_{\text{gas}}$	Laju alir biogas	200 m <sup>3</sup> /h

**Tabel 2.2** Komposisi Biogas PT Enero

Komponen	Komposisi (% vol)
$\text{CH}_4$	56,73
$\text{CO}_2$	41,31
$\text{O}_2$	1,34
$\text{H}_2\text{S}$	0,62

Berdasarkan tabel 3.2 terlihat bahwa biogas tersusun sebagian besar atas metana dan karbon dioksida sedangkan gas penyusun lainnya adalah oksigen dan hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Komposisi  $\text{H}_2\text{S}$  cukup kecil dibandingkan dengan komposisi gas lain namun apabila dilihat dalam skala ppm (*part per million*) kadar  $\text{H}_2\text{S}$  adalah sebesar 6200 ppm yang terhitung sangat besar dan apabila terdapat dalam udara bebas akan sangat beracun. Kadar  $\text{H}_2\text{S}$  yang tinggi tidak hanya berbahaya bagi kesehatan namun juga menjadi faktor terjadinya korosi pada peralatan di industri (Ghanbarabadi & Khoshandam, 2015). Standar maksimum kadar  $\text{H}_2\text{S}$  yang telah ditetapkan adalah sebesar 4 ppm sehingga harus dilakukan pengurangan kadar  $\text{H}_2\text{S}$  (Muhammad & GadelHak, 2014).

## 2.4 Absorpsi

Absorpsi merupakan proses yang terjadi ketika suatu komponen gas (absorbat) berdifusi ke dalam cairan (absorben) dan membentuk suatu larutan. Prinsip dasar dari absorpsi adalah memanfaatkan besarnya difusivitas molekul-molekul gas pada larutan tertentu dan dapat dilakukan pada gas-gas atau cairan yang relatif berkonsentrasi rendah maupun yang berkonsentrasi tinggi (konsentrat). Campuran gas apabila dikontakkan dengan cairan yang mampu melarutkan salah satu komponen dalam gas tersebut dan keduanya dikontakkan dalam jangka waktu yang cukup lama pada suhu tetap, maka akan terjadi suatu kesetimbangan dimana tidak terdapat lagi perpindahan massa.

Gas yang terlibat dalam proses absorpsi jika memiliki tekanan parsial kurang dari atm maka proses absorpsi yang berlangsung memenuhi hukum Henry (Perry dan Green, 1997) dimana,

$$p^* = H \cdot x \quad (2.1)$$

dimana,

$p^*$  : tekanan parsial gas terlarut pada kondisi ekuilibrium  
atau tekanan uap gas terlarut (bar)

$H$  : konstanta Henry yang berbeda untuk setiap kelarutan gas

$x$  : fraksi mol gas yang terlarut dalam larutan

Sedangkan tekanan parsial gas merupakan fungsi dari komposisi gas itu sendiri dimana,

$$p = y \cdot P \quad (2.2)$$

dimana,

$p$  : tekanan parsial gas (bar)

$y$  : fraksi mol gas

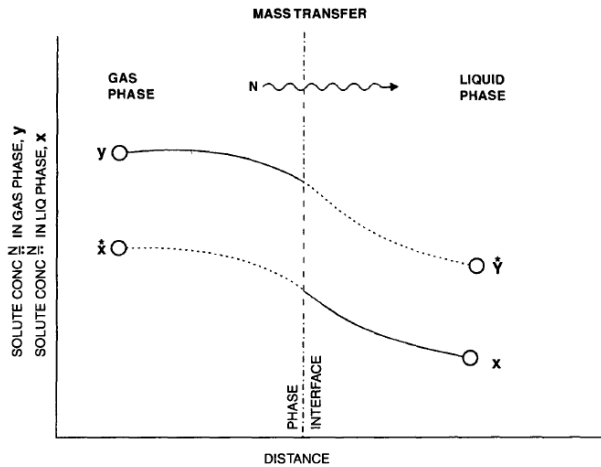
$P$  : tekanan gas total (bar)

Proses absorpsi bisa berlangsung, yang ditandai dengan terjadinya transfer zat terlarut (gas) dari fase gas ke fase cair, apabila tekanan parsial gas ( $p$ ) lebih besar daripada tekanan uap gas terlarut ( $p^*$ ). Jika tekanan uap gas terlarut sama dengan tekanan parsial gas maka tidak terjadi proses absorpsi.



## 2.5 Driving Force

Absorpsi adalah proses fisika dimana terjadi transfer massa zat terlarut (gas) dari fase gas ke fase cair. Selama proses tersebut terjadi gradien konsentrasi selama perpindahan antar fase tersebut. Gradien konsentrasi ini disebut sebagai *driving force*, dimana *driving force* ditunjukkan sebagai perbedaan konsentrasi zat terlarut pada setiap fase. *Driving force* menunjukkan seberapa besar proses absorpsi berlangsung.



**Gambar 2.3** Mekanisme Transfer Massa (Chattopadhyay, 2007)

Berdasarkan gambar di atas, nilai *driving force* ditunjukkan sebagai:

$y - y^*$  : *driving force* terhadap fase gas

$x^* - x$  : *driving force* terhadap fase cair

*driving force* juga dapat dinyatakan sebagai fungsi perubahan yang lain, diantaranya:

$p - p^*$  : *driving force* terhadap fase gas, fungsi tekanan (bar)

$c^* - c$  : *driving force* terhadap fase cair, fungsi konsentrasi ( $\text{mol/m}^3$ )

## 2.6 Wet Scrubber

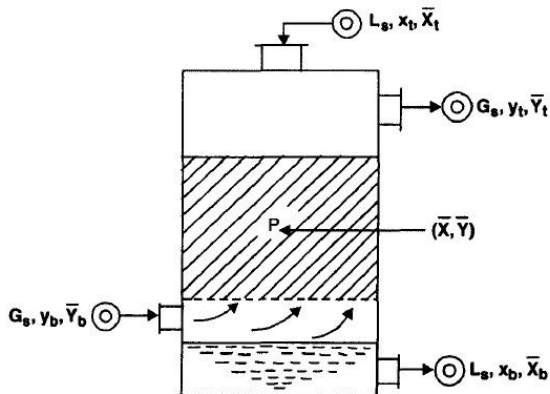
Peralatan absorpsi gas terdiri dari sebuah kolom berbentuk silinder atau menara yang dilengkapi dengan pemasukan gas dan

ruang distribusi pada bagian bawah ; pemasukan zat cair dan distributornya pada bagian atas, pengeluaran gas dan zat cair masing-masing diatas dan dibawah. Serta diisi dengan massa zat tak aktif (inert) diatas penyangganya yang disebut isian menara (*tower packing*).

Gas yang mengandung zat terlarut, disebut gas kaya (*rich gas*), masuk ke ruang pendistribusian melalui celah isian, berlawanan arah dengan zat cair. Isian itu memberikan permukaan yang luas untuk kontak antara zat cair dan gas sehingga membantu terjadinya kontak yang maksimal antara kedua fase, dan terjadi penyerapan zat terlarut yang ada di dalam *rich gas* oleh zat cair yang masuk ke dalam menara dan gas encer (*lean gas*) keluar dari atas. Sambil mengalir kebawah, zat cair makin kaya zat terlarut, dan keluar dari bawah menara sebagai cairan pekat.

### 2.6.1 Kestimbangan Material *Wet Scrubber*

Skema *wet scrubber* yang digunakan menggunakan mekanisme *countercurrent* yang artinya laju alir gas dan zat cair dalam kolom saling berlawanan. Masukan gas berada pada bagian bawah kolom dan mengalir ke atas dan masukan zat cair berada pada bagian atas kolom dan mengalir ke bawah akibat pengaruh gravitasi.



**Gambar 2.4** Skema Kolom *Wet Scrubber Countercurrent*  
(Chattopadhyay, 2007)

Kesetimbangan massa yang terjadi pada kolom *countercurrent* dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{y_b - y_t}{x_b - x_t} \quad (2.3)$$

dimana,

$L_s$  : laju alir zat cair (mol/jam)

$G_s$  : laju alir gas (mol/jam)

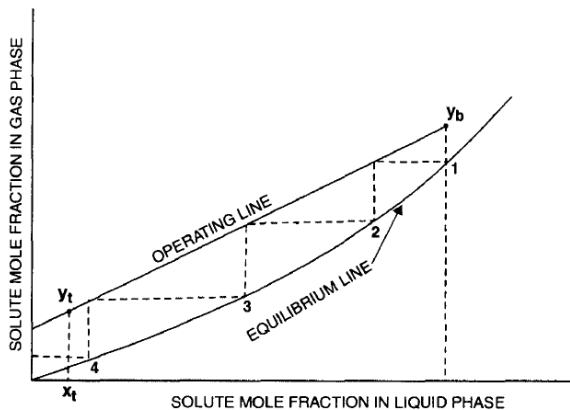
$y_b$  : fraksi mol zat terlarut dalam gas pada bagian bawah kolom

$y_t$  : fraksi mol zat terlarut dalam gas pada bagian atas kolom

$x_b$  : fraksi mol zat terlarut dalam zat cair di bagian bawah kolom

$x_t$  : fraksi mol zat terlarut dalam zat cair pada bagian atas kolom

Nilai  $y_b$  selalu lebih besar dari  $y_t$ , sebab zat terlarut (kandungan yang ingin dihilangkan) pada gas di posisi bawah kolom belum terabsorpsi ke dalam zat cair dan nilai  $x_b$  selalu lebih besar daripada  $x_t$  sebab zat cair di bawah kolom telah mengabsorpsi zat terlarut dari gas. Proses absorpsi berdasarkan persamaan di atas dapat digambarkan dalam grafik berikut:

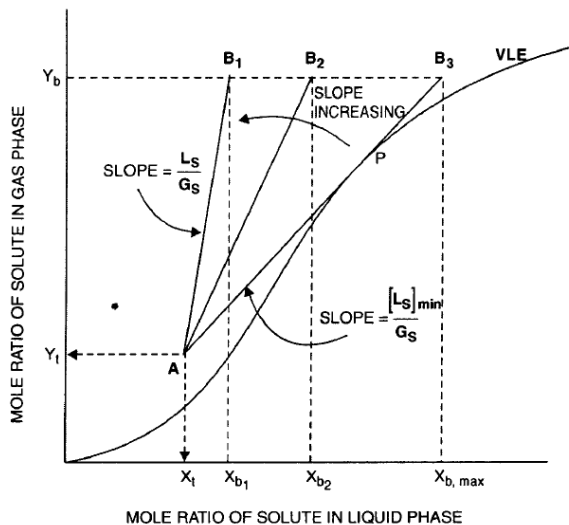


**Gambar 2.5** Garis Operasi dan Ekulibrium dari Proses Absorpsi (Chattopadhyay, 2007)

Gambar 2.4 menunjukkan bahwa terdapat 2 garis yang mencerminkan proses absorpsi, yaitu garis operasi dan garis ekulibrium atau *VLE-line* (*vapor-liquid equilibrium line*). VLE line berada di bawah garis operasi sebab selama proses absorpsi transfer zat terlarut terjadi dari fase gas ke fase zat cair. Hal ini terjadi karena konsentrasi zat terlarut dalam gas lebih tinggi dibandingkan dalam zat cair ( $Y_t > X_t$  dan  $Y_b > X_b$ ). Garis operasi adalah garis yang didapat dari mem-plot titik  $(x_t, y_t)$  dan  $(x_b, y_b)$  ke dalam grafik, garis ini juga bisa didapat dari rasio  $L/G$ . Sedangkan *VLE-line* merupakan garis yang menunjukkan absorpsi gas yang sebenarnya ke dalam zat cair.

### 2.6.2 Minimum Liq-Gas Ratio

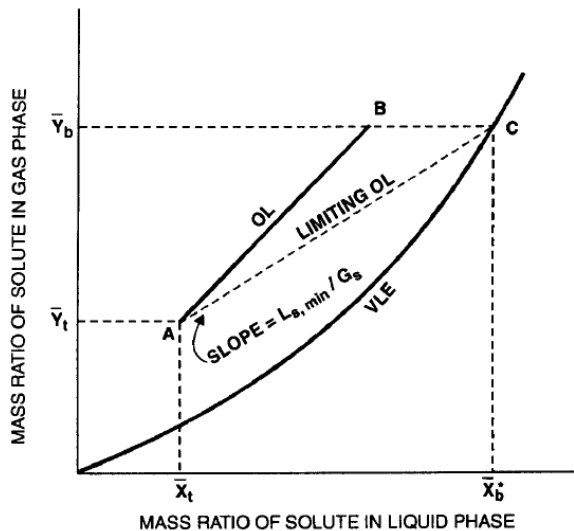
Faktor penting dalam perancangan *wet scrubber* adalah dapat menentukan besarnya laju alir zat cair minimum yang dibutuhkan agar proses absorpsi dapat terjadi sesuai dengan yang diharapkan. Biasanya laju gas ( $G_s$ ), konsentrasi zat terlarut dalam gas ( $Y_t$  dan  $Y_b$ ), serta konsentrasi zat terlarut dalam zat cair ( $X_t$ ) telah ditetapkan.



**Gambar 2.6** Minimum Liq-Gas Ratio dalam Proses Absorpsi (Chattopadhyay, 2007)

Gambar 2.5 menunjukkan bahwa garis operasi memiliki berbagai kemungkinan ( $AB_1$  dan  $AB_2$ ), sebab nilai  $X_b$  yang tidak ditentukan. Berbagai garis ini memiliki kemiringan yang berbeda-beda, yang berarti berdasarkan persamaan 2.3 semakin miring garis nilai  $L_s$  semakin besar dan  $X_b$  semakin besar oleh sebab nilai  $G_s$ ,  $Y_t$ ,  $Y_b$ , dan  $X_t$  telah ditetapkan, apabila garis operasi semakin landai maka garis operasi akan menyentuh *VLE-line*, pada garis ini ( $AB_3$ ) gradien garis menjadi  $[L_s]_{\min}/G_s$ . Titik  $L_{s, \min}$  ini laju alir air merupakan laju terkecil yang masih dapat melakukan absorpsi. Garis operasi dimana OL menyentuh *VLE-line* juga menyatakan limit dari *liq-gas ratio* atau *minimum liq-gas ratio*.

$$\text{Limit dari liq-gas ratio, } \left[ \frac{L_s}{G_s} \right]_{\lim} = \frac{L_{s, \min}}{G_s} \quad (2.4)$$



**Gambar 2.7** Garis Operasi (OL) dan *Limiting Operation Line* (Chattopadhyay, 2007)

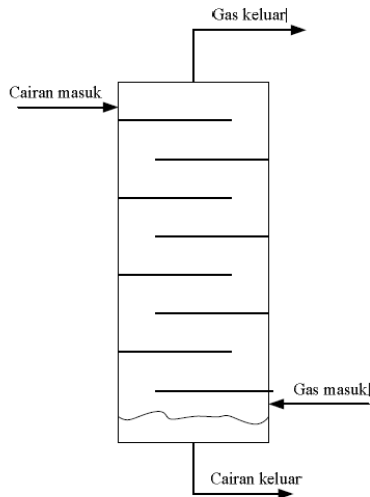
### 2.6.3 Jenis Wet Scrubber

Operasi transfer massa antara gas dan zat cair dilakukan dengan menggunakan kolom/menara yang dirancang sedemikian sehingga diperoleh kontak yang baik antara kedua fase. Alat

transfer massa yang sering digunakan adalah kolom pelat (*plate/tray column*) dan kolom paking (*packing column*) sebab kedua jenis tersebut memiliki luas permukaan kontak dengan gas yang cukup besar sehingga potensi gas terabsorpsi ke larutan pun meningkat.

#### 2.6.4 Kolom/Menara Pelat (*Plate/Tray Column*)

Kolom ini mempunyai sejumlah pelat/*tray* yang berfungsi sebagai fasilitas transfer massa komponen gas ke dalam cairan. Air masuk pada bagian puncak kolom dan mengalir menuju setiap *tray* di bawahnya. Air akan sementara tertampung pada *tray*, kemudian aliran gas akan menembus air yang masuk melalui lubang-lubang yang terdapat pada *tray*. Selama proses tersebut terjadi kontak antara gas dan air, sehingga terjadi proses absorpsi gas oleh air. Proses tersebut berlangsung terus menerus hingga air telah keluar kolom pada bagian bawah dan gas keluar pada puncak kolom.



**Gambar 2.8** *Plate/Tray Column* (Sulaiman, 2008)

### Faktor Absorpsi/Absorption Factor

Faktor absorpsi menyatakan perbandingan antara gradien garis operasi dengan gradien garis VLE-line, yang bisa dirumuskan sebagai berikut:

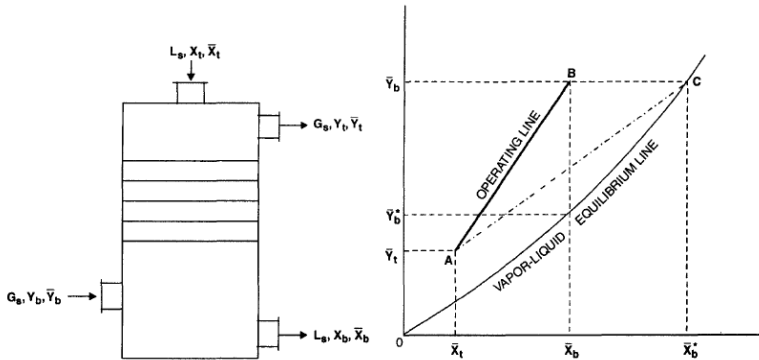
$$e_a = \frac{L_S/G_S}{m} = \frac{L_S}{m \cdot G_S} \quad (2.5)$$

dimana,

$L_S$  : laju larutan yang masuk ke kolom (mol/jam)

$G_S$  : laju gas yang masuk ke kolom (mol/jam)

$m$  : gradien garis VLE-line



**Gambar 2.9** Skema *Wet Scrubber* dan OL dan VLE-Line pada *Wet Scrubber* (Chattopadhyay, 2007)

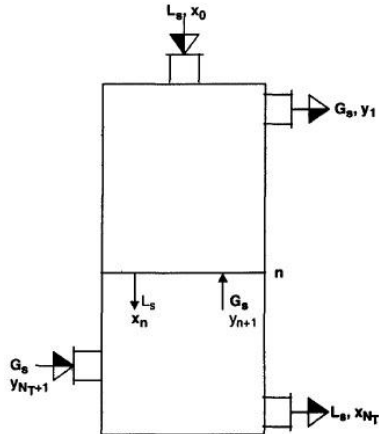
### Jumlah Tray Teoretis

Jumlah tray teoretis dalam kolom *wet scrubber* dapat ditentukan melalui persamaan:

$$N_T = \frac{\log \left( \frac{Y_{N_T+1} - m \cdot X_0}{Y_1 - m \cdot X_0} \left( 1 - \frac{1}{e_a} \right) + \frac{1}{e_a} \right)}{\log e_a} \quad (2.6)$$

dengan,

$y_0 = m \cdot x_0$  merupakan persamaan garis dari VLE-line



**Gambar 2.10** Ilustrasi Input dan Output pada *Wet Scrubber* (Chattopadhyay, 2007)

### Tinggi Kolom *Wet Scrubber* Jenis *Tray*

Tinggi kolom adalah jarak vertikal antara bagian atas dan bawah kolom dan dapat dicari dengan rumus berikut:

$$Z = (N_T - 1) \cdot l \quad (2.7)$$

dimana,

$Z$  : tinggi kolom (m)

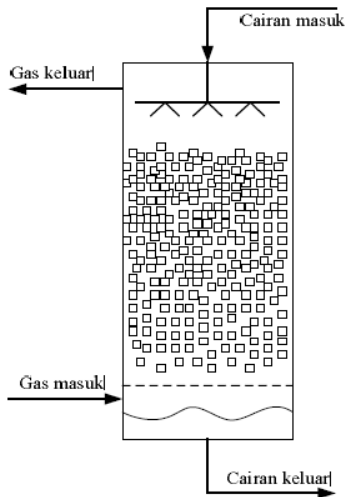
$N_T$  : jumlah total tray pada kolom

$l$  : jarak antar tray (m)

### 2.6.5 Kolom/Menara Pak (*Packed Column*)

Kolom *packed* adalah kolom yang berisi bahan pengisi (*packing*). Adapun fungsi bahan pengisi ialah untuk memperluas bidang kontak antara kedua fase. Di dalam kolom ini, air akan mengalir ke bawah melalui permukaan pengisi, sedangkan gas akan mengalir ke atas berlawanan dengan aliran air melalui ruang kosong yang ada diantara bahan pengisi. Selama kontak antara gas dan air tersebut terjadi proses absorpsi komponen gas ke air.



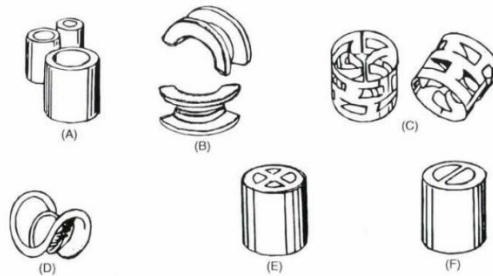


**Gambar 2.11** *Packed Column* (Sulaiman, 2008)

Kolom jenis packed ini beberapa keuntungan dibandingkan dengan kolom jenis lain, diantaranya (Chattopadhyay, 2007):

- *Pressure drop* yang rendah
- Biaya pembuatan dan konstruksi rendah (untuk desain kolom dengan diameter kurang dari 600 mm kolom jenis *packed* lebih murah dibanding dengan kolom *tray*)
- *Range* operasi yang lebih lebar dibandingkan dengan kolom *tray*
- Fleksibilitas terhadap kondisi kerja yang ada (kolom packed memiliki jenis isian / *packing* yang bervariasi yang dapat berpengaruh terhadap efisiensi dan kapasitas dari kolom yang diinginkan)
- Dapat mengatasi sifat korosif dari gas dan larutan yang digunakan
- Struktur bangun yang minimum

Bahan pengisi (*packing*) dari kolom *packed* terdiri dari 2 jenis yaitu *random packing* dan *structured packing*.



(A) Raschig rings; (B) Intalox saddles; (C) Pall rings (D) Berl saddle; (E) Cross-partition ring; (F) Lessing ring

**Gambar 2.12** *Random Packing* (Chattopadhyay, 2007)



**Gambar 2.13** *Structured Packing* (Chattopadhyay, 2007)

Perbedaan *packing* jenis *random* dan *structured* ditunjukkan oleh tabel berikut:

**Tabel 2.3** Perbandingan *Random* dan *Structured Packing* (Wilson, 2004)

<b><i>Random Packing</i></b>	<b><i>Structured Packing</i></b>
Saluran dari aliran larutan tidak memiliki bentuk yang tetap	Saluran berbentuk tetap sebab <i>packing</i> tersusun secara teratur
<i>Packing</i> memiliki ukuran mulai dari ½ sampai 4 inci dan disusun dalam kolom secara acak	<i>Packing</i> memenuhi luasan dari diameter kolom dan memiliki tebal antara 6-12 inci
Terbuat dari keramik, logam, dan plastik	Memiliki luas permukaan yang lebih tinggi daripada <i>random packing</i>

**Tabel 2.3** Lanjutan

<i>Packing</i> mudah dipindahkan ke tempat yang dituju dan mudah disimpan	Pemindahan <i>packing</i> sulit sebab rawan merusak bentuk <i>packing</i>
Lebih murah dibandingkan dengan <i>structured packing</i>	Performa lebih baik daripada <i>random packing</i> tapi mahal

Tujuan utama dari *packing* adalah memaksimalkan efisiensi absorpsi dari kapasitas gas yang ada dengan biaya yang minimum. Oleh sebab itu material *packing* didesain agar mencapai karakteristik berikut (Perry dan Green, 1997):

- Meningkatkan luas permukaan spesifik – maka kontak area *vapor-liquid* akan semakin naik sehingga efisiensi absorpsi akan meningkat
- Menyebarkan luas permukaan secara merata – hal ini juga akan berakibat pula pada meningkatnya kontak area *vapor-liquid*
- Meningkatkan ruang kosong (*void space*) per satuan volume – hal ini akan memperkecil kemungkinan aliran gas berlebih ke atas kolom, sehingga kapasitas *packing* meningkat
- Memperkecil gesekan – hal ini akan membantu pada karakteristik aerodinamik pada *packing*
- Menimalkan biaya

Dua faktor penting dalam pemilihan jenis *packing* adalah luas permukaan (*surface area*) dan *void fraction packing* (Arachchige dan Melaanen, 2012). Aspen Plus dapat mensimulasikan berbagai jenis *packing* termasuk jenis ukuran dan materialnya. Aspen Plus memiliki database dari berbagai vendor dan hal yang terkait informasi *packing* seperti nilai *surface area*, *void fraction*, serta *packing factor*.

### **HETP (*Height Equivalent to A Theoretical Plate*) Kolom Wet Scrubber Jenis Packed**

HETP menyatakan efisiensi dari jenis *packing* yang digunakan dalam proses absorpsi. Nilai HETP bisa diperoleh dari korelasi antara tegangan permukaan dan kekentalan zat cair (Dolan, 1982) yang dirumuskan:

$$\ln HETP = n - 0,187. \ln \sigma + 0,213. \ln \mu \quad (2.8)$$

dimana,

HETP : *Height Equivalent to A Theoretical Plate*

n : konstanta *packing*

$\sigma$  : tegangan permukaan zat cair (dyne/cm)

$\mu$  : viskositas/kekentalan zat cair (cP)

### **Tinggi Kolom Wet Scrubber Jenis Packed**

Tinggi kolom diperoleh melalui perkalian antara HETP dengan jumlah tray teoretis

$$Z = N_T \times HETP \quad (2.9)$$

dimana,

Z : tinggi kolom

$N_T$  : jumlah tray teoritis

### **2.7 Mekanisme Absorpsi Wet Scrubber**

Proses absorpsi gas ke air disertai pula oleh transfer massa dari gas tersebut, dimana gas tersebut mengalami peralihan dari fase gas ke fase cair. Proses absorpsi gas tersebut dapat ditunjukkan melalui laju transfer massa dari fase gas ke fase cair sebagai berikut:

$$N = K_{G,p} \cdot A \cdot (p - p^*) \quad (2.10)$$

dimana,

N : laju transfer massa (mol/s)

$K_{G,p}$  : koefisien transfer massa fungsi tekanan (mol/s.m<sup>2</sup>.Pa)

A : luas area transfer massa (m<sup>2</sup>)

$p-p^*$  : *driving force* terhadap fase gas, fungsi tekanan (Pa)

Laju transfer massa di atas merupakan laju transfer massa ditinjau dalam fase gas, dimana laju transfer massa juga dapat ditinjau dalam fase cair yaitu

$$N = K_{L,c} \cdot A \cdot (c^* - c) \quad (2.11)$$

dimana,

N : laju transfer massa (mol/s)

$K_{L,c}$  : koefisien transfer massa fungsi konsentrasi (m/s)

- A : luas area transfer massa ( $\text{m}^2$ )  
 $c^*-c$  : *driving force* terhadap fase cair, fungsi konsentrasi ( $\text{mol}/\text{m}^3$ )

Laju transfer massa ditinjau secara fase gas dan fase cair memiliki nilai yang sama, sehingga diperoleh hubungan:

$$K_{G,p} \cdot A \cdot (p - p^*) = K_{L,c} \cdot A \cdot (c^* - c) \quad (2.12)$$

Berdasarkan persamaan di atas terlihat bahwa laju transfer massa bergantung pada nilai koefisien transfer massa ( $K_{G,p}$  atau  $K_{L,c}$ ), luas area transfer massa, dan *driving force*. Nilai koefisien transfer massa ini bergantung pada jenis *wet scrubber*, dimana pada penelitian yang digunakan adalah jenis kolom *tray* dan *packed*. Luas area transfer massa menyatakan besarnya permukaan kontak antara gas dan zat cair, sehingga semakin luas permukaan kontak maka laju transfer massa semakin cepat yang berarti bahwa proses absorpsi juga semakin besar. *Driving force* merupakan parameter absorpsi yang nilainya tergantung dari *pressure drop* yang terjadi, semakin rendah *pressure drop* yang terjadi maka *driving force* semakin tinggi.

### 2.7.1 Laju Transfer Massa Kolom Tray

Selain *driving force*, laju transfer massa pada kolom *tray* dipengaruhi oleh nilai koefisien transfer massa dan luas area transfer massa. Nilai koefisien transfer massa untuk kolom *tray* dapat diperoleh melalui persamaan berikut (Chan dan Fair 1984):

$$K_{L,c} = 19700 \cdot D^{0,5} \cdot \frac{0,4 \cdot F_s \cdot 0,17}{a} \quad (2.13)$$

dimana,

- D : difusivitas gas pada fase cair ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $F_s$  : laju superfisial gas/*F-factor* ( $\text{kg}^{0,5}/\text{m}^{0,5} \cdot \text{s}$ )  
 $a$  : *interfacial area* ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )  
 $a$  merupakan fungsi dari spesifikasi *tray*, jenis, dan laju zat cair

Sedangkan luas area transfer massa pada kolom *tray* ditunjukkan sebagai besarnya luas diameter kolom

$$A = A_d = \pi \frac{D^2}{4} \quad (2.14)$$

dimana,

$A_d$  : luas diameter kolom ( $m^2$ )

$D$  : diameter kolom (m)

Berdasarkan persamaan di atas terlihat bahwa secara umum laju transfer massa untuk kolom *tray* bergantung pada laju gas, laju zat cair, spesifikasi *tray* yang digunakan, serta diameter kolom.

### 2.7.2 Laju Transfer Massa Kolom *Packed*

Sama seperti kolom *tray*, laju transfer massa pada kolom *packed* juga dipengaruhi oleh nilai koefisien transfer massa dan luas area transfer massa. Koefisien transfer massa untuk kolom *packed* ditunjukkan melalui persamaan berikut (Bravo dan Fair, 1982):

$$K_{L,c} = 0,0051 \cdot Re^{0,667} \cdot Sc^{-0,5} \cdot (a \cdot d)^{0,4} \cdot \left( \frac{\mu \cdot g}{\rho} \right)^{0,333} \quad (2.15)$$

dimana,

$K_{L,c}$  : koefisien transfer massa fungsi konsentrasi (m/s)

$Re$  : bilangan Reynold

$Sc$  : bilangan Schmidt

$a$  : luas permukaan *packing* ( $m^2/m^3$ )

$d$  : ukuran *packing* (m)

$\mu$  : viskositas zat cair (Pa.s)

$g$  : percepatan gravitasi ( $m^2/s$ )

$\rho$  : molaritas air ( $kmol/m^3$ )

Bilangan Reynold ditentukan melalui persamaan berikut:

$$Re = \frac{\rho_L \cdot u}{\mu \cdot a_e} \quad (2.16)$$

dimana,

$\rho_L$  : massa jenis zat cair ( $kg/m^3$ )

- $u$  : laju superfisial zat cair (m/s)  
 $\mu$  : viskositas zat cair (Pa.s)  
 $a_e$  : luas permukaan efektif per unit volume kolom ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )  
 $a_e$  merupakan fungsi dari spesifikasi *packing*, tinggi kolom, dan laju gas

Bilangan Schmidt ditentukan melalui persamaan berikut:

$$Sc = \mu / \rho_L \cdot A \quad (2.17)$$

dimana,

$A$  : luas diameter kolom ( $\text{m}^2$ )

Sedangkan luas area transfer massa pada kolom *packed* ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$A = A_d \cdot Z \cdot a \quad (2.18)$$

dimana,

$A_d$  : luas diameter kolom ( $\text{m}^2$ )

$Z$  : tinggi kolom (m)

$a$  : luas permukaan *packing* ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )

Berdasarkan persamaan di atas terlihat bahwa secara umum laju transfer massa untuk kolom *packed* bergantung pada laju gas, laju zat cair, spesifikasi *packing*, serta luas permukaan *packing*. Jenis *packing* yang digunakan akan mempengaruhi transfer massa gas terlarut sehingga pemilihan *packing* merupakan salah satu faktor penting dalam perancangan *wet scrubber* untuk jenis *packed*.

## 2.8 Pressure Drop

Proses absorpsi kolom *tray* dan kolom *packed* dapat dipahami sebagai absorpsi bertingkat, dimana terdapat tingkatan pada kolom yang ditunjukkan sebagai *tray* teoritis. Proses absorpsi berlangsung dari satu tingkat menuju ke tingkat lainnya dan terjadi transfer massa gas dari fase gas ke fase cair. Selama perjalanan gas dari satu tingkat ke tingkat lainnya tersebut terjadi *pressure drop*, dan menyebabkan tekanan gas semakin menurun setiap tingkatannya. Terjadinya *pressure drop* ini akan menyebabkan tekanan parsial

gas menurun, sehingga *driving force* juga turut menurun. Turunnya *driving force* akan menyebabkan transfer massa gas juga menurun sehingga bisa dikatakan proses absorpsi juga menurun akibat terjadinya *pressure drop*. Oleh sebab itu dalam perancangan *wet scrubber*, *pressure drop* juga termasuk parameter penting. Terjadinya *pressure drop* pada kolom *tray* dan *packed* berbeda yang bergantung pada spesifikasi *tray* dan *packing* yang digunakan.

*Pressure drop* pada kolom *tray* secara umum ditunjukkan sebagai berikut:

$$\Delta P_t = \Delta P_{d,t} + \Delta P_{L,t} \quad (2.19)$$

dimana,

$\Delta P_t$  : total *pressure drop* pada kolom *tray* (bar)

$\Delta P_{d,t}$  : *pressure drop* yang terjadi ketika gas melewati lubang pada *tray* (bar)

$\Delta P_{L,t}$  : *pressure drop* akibat adanya massa air pada *tray* yang harus ditembus oleh gas (bar)

*Pressure drop* pada kolom *packed* secara umum ditunjukkan sebagai berikut:

$$\Delta P_p = \Delta P_{d,p} + \Delta P_{L,p} \quad (2.20)$$

dimana,

$\Delta P_p$  : total *pressure drop* pada kolom *packed* (bar)

$\Delta P_{d,p}$  : *dry pressure drop* atau *pressure drop* yang terjadi ketika gas melewati *packing* tanpa adanya zat cair di dalam kolom (bar)

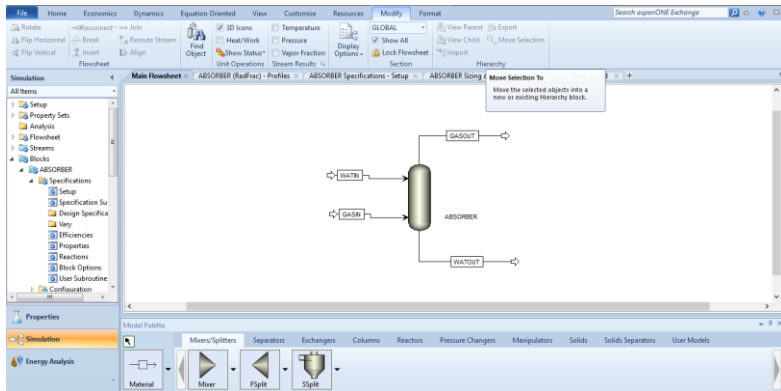
$\Delta P_{L,p}$  : *pressure drop* akibat adanya zat cair di antara *packing* (bar)

## 2.9 Software Aspen Plus

Aspen Plus digunakan untuk menganalisis *wet scrubber* yang telah dirancang. Aspen Plus menyediakan suatu unit permodelan dimana terdapat nilai masukan yang harus diberikan. Perancangan



*wet scrubber* ini menggunakan pemodelan absorber dengan nilai masukan yang diberikan dalam penelitian ini adalah karakteristik biogas produksi PT Eneo dan parameter perancangan *wet scrubber* yang sebelumnya telah didapat melalui perhitungan manual. Setelah unit pemodelan dan nilai masukan diberikan Aspen Plus akan menganalisis *wet scrubber* yang dirancang dengan menggunakan hubungan sifat fisik dasar suatu proses yaitu: *material and energy balances, thermodynamic equilibrium, rate equations* (Eden, 2012) untuk memprediksi performa *wet scrubber*.



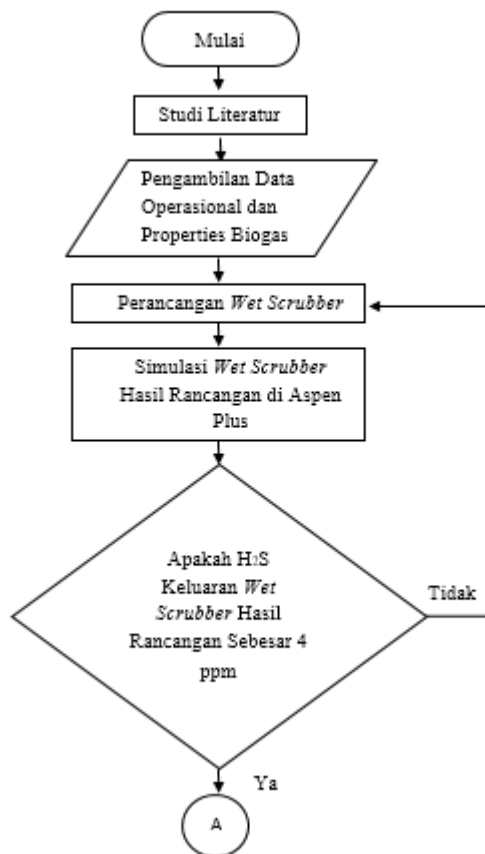
**Gambar 2.14** Tampilan Muka Perancangan *Wet Scrubber* di Aspen Plus

*Halaman ini memang dikosongkan*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Alur Penelitian

Pada subbab ini dijelaskan mengenai prosedur tahapan dalam penelitian tugas akhir yang dilakukan. Diagram alir dari tugas akhir ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut ini.





**Gambar 3.1** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

**a. Studi Literatur**

Dilakukan kajian terhadap metode-metode, konsep, atau teori yang terkait dengan penelitian yang dilakukan, baik yang bersumber dari jurnal, laporan penelitian, maupun buku-buku yang memiliki bahasan yang sesuai dengan tema penelitian.

**b. Pengambilan Data Operasional dan *Properties* Biogas**

Data yang digunakan dalam sebagai acuan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini adalah data Biogas hasil produksi PT Enero. Data yang diambil meliputi tekanan, suhu, laju alir, serta komposisi biogas.

**c. Perancangan *Wet Scrubber***

Dilakukan perancangan awal *wet scrubber*, perancangan dilakukan secara manual melalui perhitungan berdasarkan konsep-konsep serta persamaan-persamaan yang tersedia di literatur. Terdapat dua jenis perancangan yaitu perancangan kolom *tray* dan perancangan kolom *packed*. Perancangan kolom *tray* berupaya untuk mendapatkan laju alir minimum yang digunakan sebagai media absorpsi serta jumlah *tray* yang diperlukan agar proses absorpsi dapat berjalan optimal. Perancangan kolom *packed* meliputi penentuan jenis *packing*

yang digunakan serta tinggi kolom yang dihitung melalui penentuan HETP.

**d. Simulasi *Wet Scrubber* Hasil Rancangan di Aspen Plus**

Hasil yang didapatkan dari perancangan manual seperti laju alir air minimum dan besaran fisik kolom (diameter, tinggi, jumlah tray, dan jenis *packing*) dimasukkan sebagai parameter perancangan di software Aspen Plus. Data operasional dan *properties* biogas yang didapat dari lapangan juga dimasukkan sebagai acuan yang akan dianalisis.

**e. Analisis Kinerja *Wet Scrubber* Hasil Rancangan**

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui apakah *wet scrubber* hasil rancangan mampu mengurangi kadar  $H_2S$  hingga sebesar 4 ppm. Apabila *wet scrubber* belum mampu mencapai target maka akan dilakukan perancangan ulang. Pada perancangan ulang, besaran fisik kolom ditentukan guna mengetahui karakteristik dari jenis kolom yang digunakan. Karakteristik yang didapat antara lain seperti profil suhu sepanjang kolom, perubahan komposisi gas, serta jumlah air minimum masing-masing kolom. Sehingga berdasarkan karakteristik tersebut dapat ditentukan kolom mana yang tepat digunakan sebagai *wet scrubber*. Selain itu juga dilakukan analisis kinerja kolom terhadap perubahan laju alir masukan biogas, dimana perubahan laju alir biogas merupakan fluktuasi produksi biogas di lapangan.

**3.2 Pengambilan Data Operasional dan *Properties***

Data – data operasional dan *properties* diambil dari biogas hasil produksi PT Enero. Data tersebut kemudian digunakan untuk merancang *wet scrubber* yang berguna untuk mengurangi kandungan  $H_2S$  dalam biogas tersebut.

**Tabel 3.1** Rincian Data Operasional dan *Properties* Biogas PT Enero dan Pelarut yang Digunakan (Air)

Notasi	Keterangan	Nilai dan Satuan
$P_{\text{gas}}$	Tekanan biogas	1,2 bar
$T_{\text{gas}}$	Suhu Biogas	47° C
$Q_{\text{gas}}$	Laju alir biogas	200 m <sup>3</sup> /h
$\rho_L$	Massa jenis zat cair (air)	1000 kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Tegangan permukaan air	72 dyne/cm
$\mu_L$	Viskositas air	0,798.10 <sup>-3</sup> Pa.s

**Tabel 3.2** Komposisi Biogas PT Enero

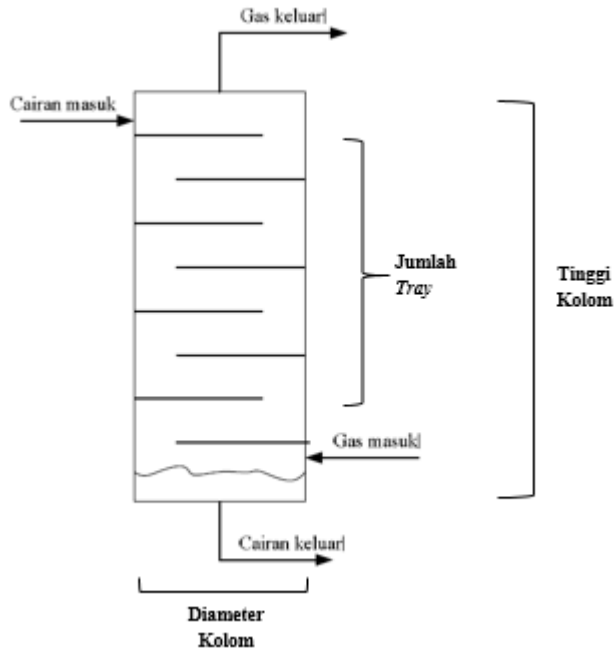
Komponen	Komposisi (% vol)
CH <sub>4</sub>	56,73
CO <sub>2</sub>	41,31
O <sub>2</sub>	1,34
H <sub>2</sub> S	0,62

### 3.3 Perancangan *Wet Scrubber*

Perancangan *wet scrubber* ini bertujuan agar kadar H<sub>2</sub>S pada gas keluaran sebesar 4 ppm, dimana langkah-langkah yang harus ditempuh terdapat pada bab 2. Dalam perancangan ini akan dihitung laju air minimum dan ditentukan spesifikasi *wet scrubber*. Spesifikasi *wet scrubber* yang dimaksud adalah tinggi kolom, diameter kolom, jumlah *tray* teoritis, dan pemilihan jenis *packing* pada perancangan kolom *packed*. Untuk diameter ditetapkan sebesar 1,5 m untuk kedua jenis kolom, hal ini dilakukan untuk mempermudah analisis. Perancangan *wet scrubber* ini berdasarkan panduan dari buku Chattopadhyay yang berjudul *Absorption and Stripping* (Chattopadhyay, 2007).

#### 3.3.1 Perancangan *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Tray*

Berikut adalah gambaran desain dari perancangan kolom *tray* yang dilakukan.



**Gambar 3.2** Desain *Wet Scrubber* Jenis Kolom Tray

Tujuan dalam mendapatkan spesifikasi perancangan kolom *tray* adalah sebagai berikut:

- **Laju air minimum**

Adalah laju air yang diperlukan agar biogas yang masuk *wet scrubber* dapat terserap oleh air sehingga kadar  $\text{H}_2\text{S}$ -nya dapat berkurang hingga 4 ppm. Penentuan laju air minimum berdasarkan teori pada bab 2 yaitu korelasi antara garis operasi dan garis ekulibrium absorpsi.

- **Jumlah tray teoritis**

Proses absorpsi pada kolom *tray* dapat dipahami sebagai absorpsi bertingkat, dimana terdapat tingkatan pada kolom yang ditunjukkan sebagai *tray* teoritis. Absorpsi terjadi pada setiap *tray*, sehingga semakin banyak *tray* maka absorpsi yang terjadi semakin besar, namun perlu ditentukan juga jumlah *tray* agar

gas yang terserap tidak melebihi target. Dalam hal ini gas yang masuk adalah biogas produksi PT Enero dan yang ingin dicapai adalah kadar  $\text{H}_2\text{S}$  pada biogas sebesar 4 ppm.

- **Diameter kolom**

Diameter menentukan besarnya luas kontak antara air dan gas sehingga menimbulkan proses absorpsi gas ke air. Dalam perancangan ini diameter kolom ditentukan agar kontak antara gas dan air menyebabkan kadar  $\text{H}_2\text{S}$  pada biogas turun menjadi 4 ppm. Pada perancangan ini diameter kolom ditetapkan sebesar 1,5 m.

- **Tinggi kolom**

Tinggi kolom dalam kolom *tray* merupakan hasil kali jumlah *tray* teoritis dengan jarak antar *tray*. Tinggi kolom berpengaruh pada biaya konstruksi, tinggi kolom *tray* ini akan dibandingkan dengan kolom *packed* untuk ditinjau manakah yang lebih ekonomis.

### **Menentukan Laju Minimum Air ke Kolom Tray ( $L_{\min}$ )**

Perhitungan ini untuk mengukur besarnya laju minimum air ke dalam kolom agar kadar  $\text{H}_2\text{S}$  pada gas keluaran sebesar 4 ppm.

- Menghitung fraksi mol dari kandungan gas:

$$y_b = 0,0062$$

fraksi mol  $\text{H}_2\text{S}$  dalam gas di bawah (*bottom*) kolom *wet scrubber*, didapat dari kandungan masukan gas  $\text{H}_2\text{S}$  yang sebesar 0,62%

$$y_t = 0,000004$$

fraksi mol  $\text{H}_2\text{S}$  dalam gas di puncak (*top*) kolom *wet scrubber*, didapat dari kandungan  $\text{H}_2\text{S}$  yang diinginkan yaitu sebesar 4 ppm atau 0,0004%

$$x_t = 0$$

fraksi mol  $\text{H}_2\text{S}$  dalam air di puncak (*top*) kolom *wet scrubber*, yang diasumsikan tanpa kandungan  $\text{H}_2\text{S}$  sama sekali



- Menghitung rasio mol dari kandungan gas

$$Y_b = \frac{y_b}{1 - y_b} = \frac{0,0062}{1 - 0,0062} = 0,0062 \frac{\text{kmol } H_2S}{\text{kmol gas lain}}$$

$Y_b$  adalah rasio antara mol  $H_2S$  dengan mol gas lain yang terdapat di bawah kolom *wet scrubber*

$$Y_t = \frac{y_t}{1 - y_t} = \frac{0,000004}{1 - 0,000004} = 0,000004 \frac{\text{kmol } H_2S}{\text{kmol gas lain}}$$

$Y_t$  adalah rasio antara mol  $H_2S$  dengan mol gas lain yang terdapat di atas kolom *wet scrubber*

- Koversi satuan laju alir gas dari  $m^3/h$  menjadi  $kmol/jam$

$$G_b = 200 \cdot \frac{273}{320} \cdot \frac{120}{101,325} \cdot \frac{1}{22,41} = 9,017 \text{ kmol/jam}$$

Laju sebesar 9,017  $kmol/jam$  merupakan laju alir dari seluruh gas, untuk mengetahui laju alir dari gas tanpa kandungan  $H_2S$  dapat dihitung sebagai berikut:

$$G_s = G_b \cdot (1 - y_b) = 9,017 \cdot (1 - 0,0062) = 8,961 \frac{\text{kmol}}{\text{jam}}$$

- Penentuan persamaan garis *VLE-line* dilakukan dengan mengamsusikan bahwa *VLE-line* merupakan garis lurus. *VLE-line* ditentukan berdasarkan data absorpsi fraksi mol  $H_2S$  dalam zat cair dan gas ( $x$  dan  $y$ ) yang didapat dari penelitian Er Show Lin yang berjudul *a modelling study of  $H_2S$  absorption in pure water and in rainwater* (Lin, 2004). Langkah-langkah penentuan persamaan garis adalah sebagai berikut:

- a. Karena gas masukan memiliki suhu  $47^0 \text{ C}$  dan tekanan pada 1,2 bar sehingga berdasarkan data penelitian nilai  $x$  dan  $y$  diambil melalui pendekatan pada suhu  $40^0 \text{ C}$  dan tekanan sistem 1,25 bar

$$x = 0,0015$$

$$y = 0,9402$$

- b. Sistem absorpsi  $H_2S$ -air ini bersifat non-ideal yang artinya hukum Henry berlaku, sehingga untuk mencari persamaan garis dapat diperoleh melalui:

$$p = yP$$

$$p = 0,9402 \cdot 1,25$$

$$p = 1,1753$$

Maka berdasarkan hukum Henry

$$p = Hx$$

$$1,1753 = H \cdot 0,0015$$

$$H = 783,533$$

- c. Maka persamaan garis VLE diperoleh melalui

$$y = \frac{H}{P}x = \frac{783,533}{1,25}x = 626,8264x$$

- Langkah berikutnya adalah menentukan nilai  $x$  saat  $y = 0,0062$  yaitu nilai VLE saat fraksi gas 0,62%  
 $0,0062 = 626,8264 \cdot X$   
 $X = 0,000009891$   
 nilai ini merupakan nilai rasio mol gas  $H_2S$  VLE dalam larutan saat rasio gas masukan sebesar 0,62%

- Langkah terakhir adalah menentukan laju minimum air ke kolom melalui persamaan berikut:

$$L_{s,min} = G_s \frac{Y - Y_t}{X - X_t} = 8,961 \frac{0,0062 - 0,0000004}{0,000009891 - 0} = 5613,42 \text{ kmol/jam}$$

Sehingga apabila bila laju alir air saat operasi sama dengan  $1,5 \cdot L_{s,min}$  maka,

$$L_s = 1,5 \cdot L_{s,min} = 1,5 \cdot 5613,42 = 8420,13 \text{ kmol/jam}$$

- Sehingga kandungan gas  $H_2S$  pada air di bagian bawah kolom adalah:

$$X_b = \frac{G_s}{L_s} [Y_b - Y_t] + X_t = \frac{8,961}{8420,13} [0,0062 - 0,0000004] + 0 = 0,000006594$$

### Menentukan Jumlah Tray Teoretis

Tray teoretis adalah jumlah tray yang dibutuhkan secara teori agar proses absorpsi dapat menghasilkan kandungan gas  $H_2S$  yang diinginkan yaitu sebesar 4 ppm. Alur perhitungan untuk menentukan jumlah tray teoretis adalah sebagai berikut:

- Pertama menentukan *absorption factor* ( $e_a$ ), dapat dicari melalui mekanisme berikut:

Menentukan nilai laju alir air  $L_b$

$$L_b = L_s \cdot (1 + X_b) = 8420,19 \text{ kmol/jam}$$

Menentukan nilai *absorption factor* pada bawah kolom *wet scrubber*

$$[e_a]_b = \frac{L_b}{m \cdot G_b} = 1,49$$

Menentukan nilai laju alir air  $L_s$

$$L_t = L_s \cdot (1 + X_t) = 8420,13 \text{ kmol/jam}$$

Menentukan nilai laju alir gas  $G_t$

$$G_t = G_s \cdot (1 + Y_t) = 8,961 \text{ kmol/jam}$$

Menentukan nilai *absorption factor* pada atas kolom *wet scrubber*

$$[e_a]_t = \frac{L_t}{m \cdot G_t} = 1,50$$

Setelah nilai *absorption factor* pada atas dan bawah kolom diketahui, maka *absorption factor* totalnya adalah

$$e_a = \sqrt{[e_a]_b \cdot [e_a]_t} = 1,496$$

- Kemudian jumlah tray teoretis dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut

$$N_T = \frac{\log \left( \frac{Y_b - m \cdot X_t}{Y_t - m \cdot X_t} \left( 1 - \frac{1}{e_a} \right) + \frac{1}{e_a} \right)}{\log e_a}$$

$$N_T = 15,5 \sim 16$$

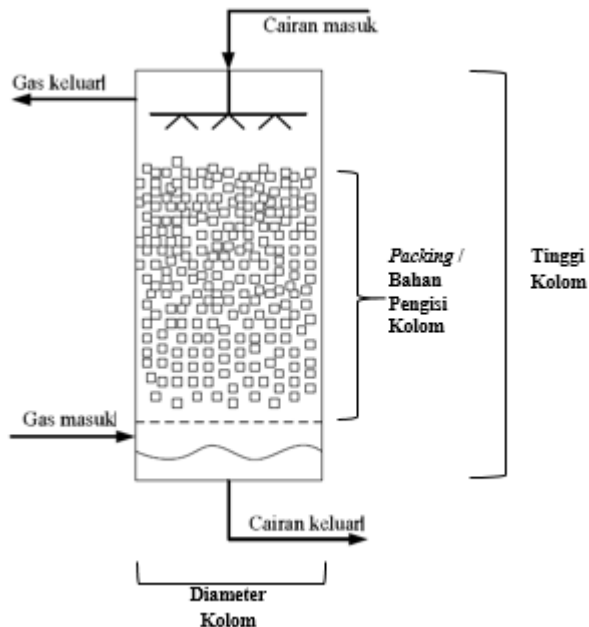
### Menentukan Tinggi Kolom

Jarak antar tray ditetapkan sebesar 0,6 m, maka tinggi total kolom tray ditentukan melalui:

$$Z = (N_T - 1) \cdot l = (16 - 1) \cdot 0,6 = 9 \text{ m}$$

### 3.3.2 Perancangan *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed*

Berikut adalah gambaran desain dari perancangan kolom *tray* yang dilakukan.



**Gambar 3.3** Desain *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed*

Tujuan dalam mendapatkan spesifikasi perancangan kolom *packed* adalah sebagai berikut:

- **Laju air minimum**

Sama seperti kolom *tray*, penentuan laju air minimum pada kolom *packed* bertujuan agar jumlah air yang masuk ke kolom dapat menyebabkan  $H_2S$  terserap dan kadarnya dalam biogas menjadi 4 ppm. Laju air minimum pada kolom *packed* sama seperti laju air minimum pada kolom *tray*, sebab berkaitan dengan jumlah *tray* teoritis, dimana jumlah *tray* teoritis pada kolom *packed* digunakan untuk mencari tinggi kolom.

- **Diameter kolom**

Diameter menentukan besarnya luas kontak antara air dan gas sehingga menimbulkan proses absorpsi gas ke air. Dalam perancangan ini diameter kolom ditentukan agar kontak antara gas dan air menyebabkan kadar  $H_2S$  pada biogas turun menjadi 4 ppm. Pada perancangan ini diameter kolom ditetapkan sebesar 1,5 m.

- **Tinggi kolom**

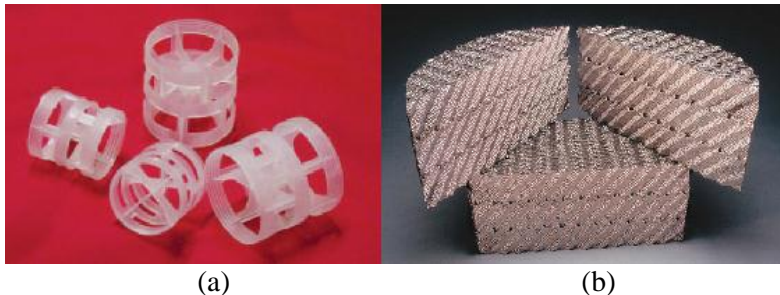
Tinggi kolom menentukan banyaknya jumlah *packing* pada kolom, semakin banyak jumlah *packing* maka semakin luas permukaan *packing* dan menyebabkan proses absorpsi meningkat. Untuk itu perlu ditentukan tinggi kolom agar absorpsi yang terjadi dapat menyebabkan kadar  $H_2S$  pada biogas sebesar 4 ppm.

- **Jenis *packing***

Jenis *packing* perlu ditentukan karena ada ketentuan khusus dalam penggunaannya, seperti misal jenis *packing* yang dapat digunakan dalam proses absorpsi  $H_2S$ . Jenis *packing* yang berbeda juga mempunyai luas permukaan *packing* yang berbeda, dimana akan mempengaruhi proses absorpsi yang berlangsung.

### **Menentukan Jenis *Packing***

Jenis *packing* yang digunakan adalah *random packing* dan *structured packing*. *Random packing* yang dipilih adalah jenis Pall Ring dengan material plastik. Pall Ring dipilih sebab dapat digunakan dalam proses absorpsi  $H_2S$  (Koch-Glitch, 2010) material plastik digunakan sebab lebih murah dibandingkan dengan material jenis lain. *Packing* Pall Ring yang digunakan divariasi ukurannya yaitu sebesar 25 mm, 38 mm, dan 50 mm untuk mengetahui efeknya terhadap proses absorpsi  $H_2S$ . Kinerja *random packing* ini kemudian akan dibandingkan dengan *structured packing* berjenis Intalox Structured Packing.



**Gambar 3.4** Jenis *Packing*: (a) Pall Ring (Koch-Glitch, 2010)  
(b) Intalox Structured Packing (Koch-Glitch, 2015)

Berikut adalah spesifikasi dari *packing* yang digunakan sebagai isian dari kolom *packed*

**Tabel 3.3** Spesifikasi *Packing*

Jenis <i>Packing</i>	Material	Ukuran	Surface Area, $a$ ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )	Voids, $\epsilon$ (%)
Pall Ring	Plastik	25 mm	207	90
Pall Ring	Plastik	38 mm	128	91
Pall Ring	Plastik	50 mm	102	92
ISP	Logam	2T	215	98

### Menentukan HETP (*Height Equivalent to A Theoretical Plate*)

HETP ditentukan berdasarkan persamaan 2.8 yang merupakan fungsi korelasi antara jenis *packing*, viskositas dan tegangan permukaan sebagai berikut:

$$\ln HETP = n - 0,187 \cdot \ln \sigma + 0,213 \cdot \ln \mu$$

Zat cair yang digunakan sama yaitu air, maka nilai HETP bergantung pada konstanta  $n$  (Strigle, 1994), sehingga nilai HETP masing-masing jenis *packing* adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.4** Nilai HETP *Packing*

Jenis <i>Packing</i>	n	HETP (m)
Pall Ring (25 mm)	1,13080	0,4045
Pall Ring (38 mm)	1,39510	0,5269
Pall Ring (50 mm)	1,65840	0,6856
ISP	1,01280	0,3595

### Menentukan Tinggi Kolom

Tinggi kolom dapat diperoleh dari perkalian antara HETP dengan jumlah tray teoritis

$$Z = N_T \times HETP$$

Sehingga dengan jumlah tray teoritis yang sama, maka tinggi kolom adalah

**Tabel 3.5** Tinggi Kolom *Packed*

Jenis <i>Packing</i>	Tinggi Kolom (m)
Pall Ring (25 mm)	6,07
Pall Ring (38 mm)	7,90
Pall Ring (50 mm)	10,28
ISP	5,39

### 3.4 Perancangan *Wet Scrubber* di *Software Aspen Plus*

Perancangan *wet scrubber* di *software Aspen Plus* bertujuan untuk mengetahui karakteristik hasil rancangan yang telah dilakukan. Hal ini dilakukan setelah parameter perancangan seperti laju air minimum dan spesifikasi *wet scrubber* didapatkan. Karakteristik perancangan yang dikaji meliputi:

- **Kinerja Absorpsi**

Analisis ini berupaya untuk mengetahui kinerja dari *wet scrubber* yang dirancang. Kinerja ditunjukkan oleh kemampuan *wet scrubber* dalam mengabsorpsi H<sub>2</sub>S.

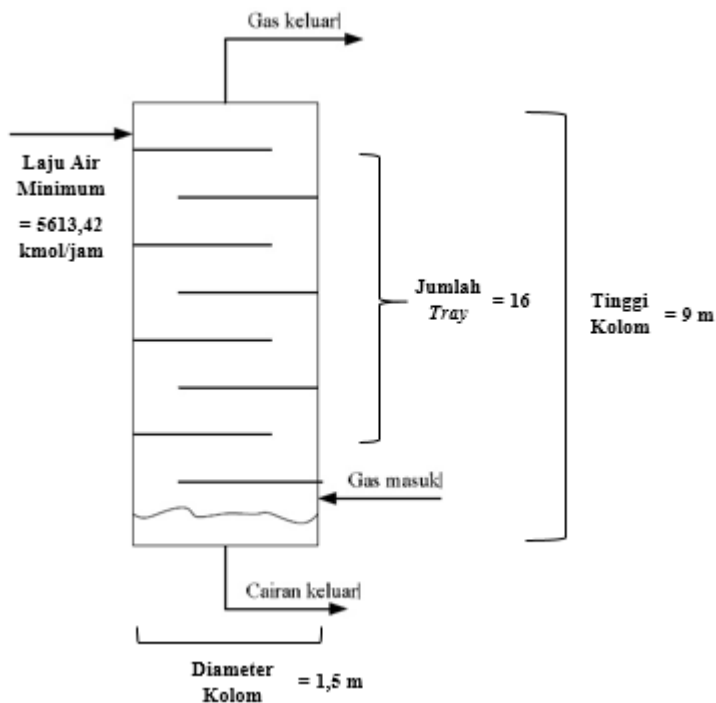
- **Pressure Drop**

*Pressure drop* adalah salah satu parameter yang mempengaruhi absorpsi. Semakin rendah *pressure drop* yang terjadi menandakan absorpsi yang berlangsung lebih efisien. Semakin rendah *pressure drop* yang terjadi maka semakin baik *wet scrubber* tersebut.

- **Rancang Bangun**

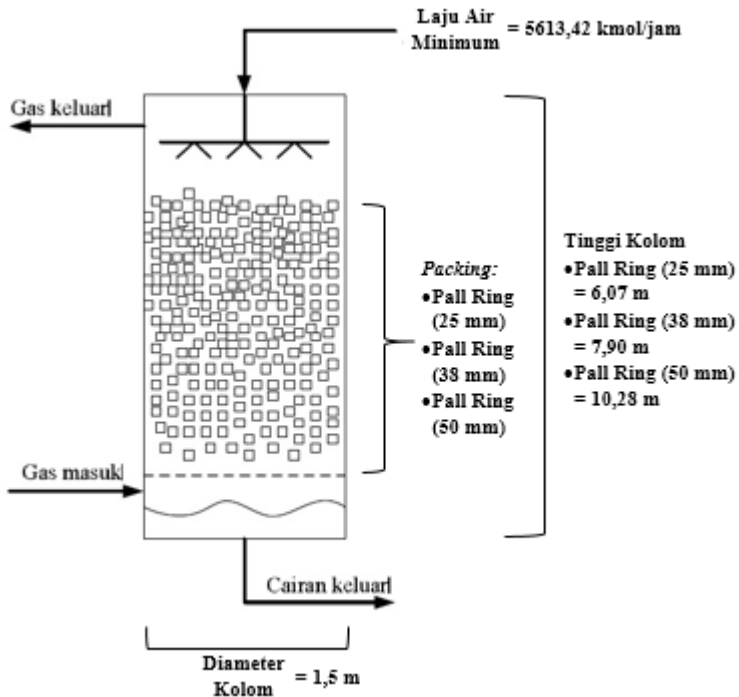
Rancang bangun dilihat dari segi tinggi kolom, semakin rendah tinggi kolom maka biaya konstruksi semakin sedikit.

Berikut adalah desain dari *wet scrubber* yang telah dirancang berdasarkan perhitungan manual sebelumnya:



**Gambar 3.5** Desain Akhir *Wet Scrubber* Jenis Kolom Tray

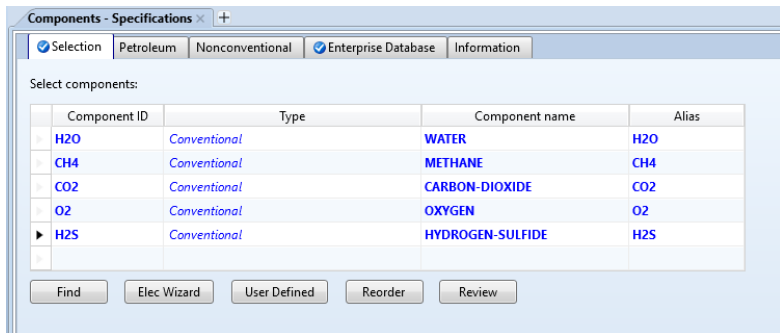




**Gambar 3.6** Desain Akhir Wet Scrubber Jenis Kolom Packed

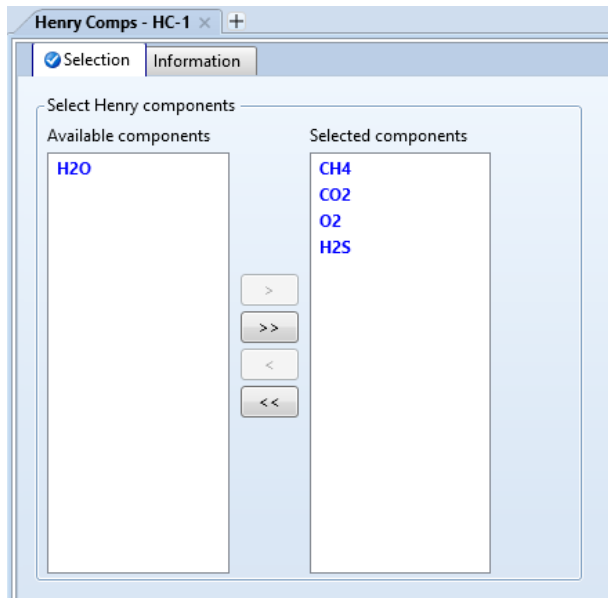
Berdasarkan perancangan yang dilakukan manual kemudian dilakukan perancangan di Aspen Plus yang berfungsi untuk mengetahui karakteristik hasil rancangan. Berikut adalah langkah-langkah dalam perancangan di Aspen Plus

- a. Memasukkan komponen unsur atau senyawa dalam proses ini yaitu: air, metana, karbon dioksida, oksigen, dan  $\text{H}_2\text{S}$



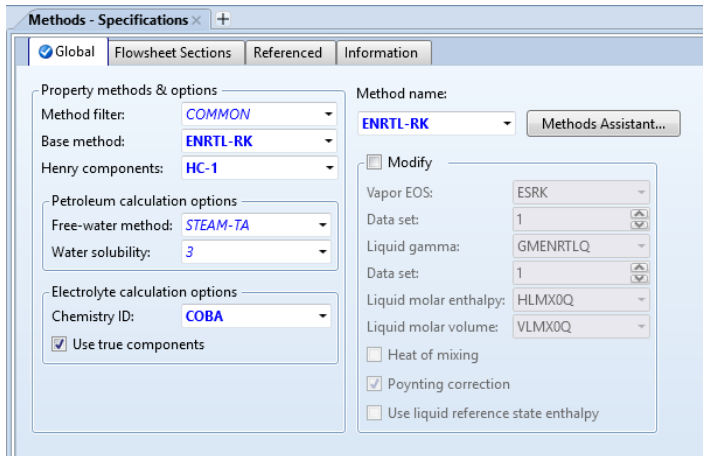
**Gambar 3.7** Komponen Proses Aspen Plus

- b. Menentukan komponen yang termasuk *Henry Component*, dimana air sebagai media pelarut dan gas sebagai media terlarut



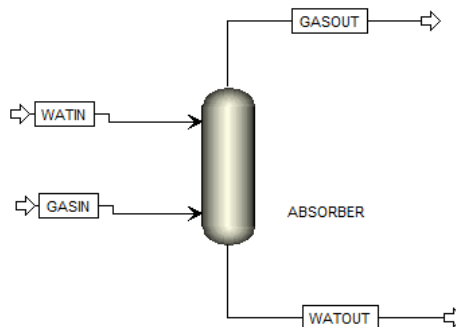
**Gambar 3.8** Penentuan *Henry Component*

- c. Menentukan *property method* dalam proses, dimana untuk proses absorpsi H<sub>2</sub>S menggunakan *property method* ENRTL-RK



**Gambar 3.9** Penentuan *Property Method*

- d. Merancang *wet scrubber* dalam *flowsheet* Aspen Plus dengan menggunakan kolom Radfrac sebagai model *wet scrubber* serta menentukan *material stream* proses, yaitu watin sebagai air yang masuk, watout sebagai air yang keluar, gasin sebagai gas yang masuk, dan gasout sebagai gas yang keluar



**Gambar 3.10** Pemodelan *Wet Scrubber* di Aspen Plus

- e. Memasukkan data spesifikasi proses dalam *material stream* sesuai dengan data lapangan yaitu data biogas PT Enero dan data perancangan yaitu data air yang masuk kolom

**Specifications**

Flash Type: **Temperature** **Pressure**

State variables:

Temperature: **47** **C**

Pressure: **1.2** **bar**

Vapor fraction:

Total flow basis: **Volume**

Total flow rate: **200** **cum/hr**

Solvent:

Composition: **Stdvol-Frac**

Component	Value
H2O	
CH4	<b>0.5673</b>
CO2	<b>0.4131</b>
O2	<b>0.0134</b>
H2S	<b>0.0062</b>

Total: **1**

**Gambar 3.11** Penentuan Spesifikasi *Material Stream*

- f. Memasukkan data spesifikasi *wet scrubber* yaitu jumlah *tray* teoritis

**Configuration** **Streams** **Pressure** Condenser Reboiler 3-Phase Information

Setup options:

Calculation type: **Rate-Based**

Number of stages: **16** **Stage Wizard**

Condenser: **None**

Reboiler: **None**

Valid phases: **Vapor-Liquid**

Convergence: **Standard**

Operating specifications:

Free water reflux ratio: **0** **Feed Basis**

**Gambar 3.12** Penentuan Data Spesifikasi *Wet Scrubber*

- g. Memasukkan data perancangan kolom *tray* dan *packed* pada bagian *rating* model kolom *radfrac*. Data perancangan tersebut adalah diameter, tinggi, dan jenis *packing* untuk kolom *packed*

**Specifications** | Design / Pdrop | Layout | Downcomers

**Trayed section**

Starting stage: 1 Ending stage: 15

Tray type: Sieve Number of passes: 1

**Tray geometry**

Diameter: 1.5 meter Deck thickness: 10 GAUGE

Tray spacing: 0.6 meter

**Weir heights**

Panel A	Panel B	Panel C	Panel D
meter	meter	meter	meter

**Gambar 3.13** Penentuan Data Spesifikasi Kolom *Tray*

**Specifications** | Design / Pdrop | Stichlmair

**Packing section**

Starting stage: 1 Ending stage: 15 Type: ISP

**Packing characteristics**

Vendor: NORTON Section diameter: 1.5 meter

Material: METAL Packing size: meter

Dimension: 2T Packing factor: 1/m

**Packed height**

☒ Packed height per stage: 0.3595 meter

☐ Section packed height: meter

**Gambar 3.14** Penentuan Data Spesifikasi Kolom *Packed*

- h. Setelah semua parameter perancangan kemudian klik **Next** agar Aspen Plus dapat menganalisis hasil rancangan *wet scrubber*

### 3.5 Analisis Kinerja *Wet Scrubber* Hasil Rancangan

Dilakukan dua analisis pada *wet scrubber*, yaitu analisis terhadap laju alir biogas tetap dan laju alir biogas yang berubah. Pada analisis pertama, laju alir biogas merupakan kondisi operasi rata-rata di lapangan, analisis dilakukan untuk mengetahui kinerja *wet scrubber* hasil perancangan saat operasi berjalan pada kondisi

normal. Kinerja yang dimaksud adalah apakah *wet scrubber* hasil perancangan mampu memenuhi syarat yaitu agar kadar  $\text{H}_2\text{S}$  pada gas keluaran sebesar 4 ppm. Apabila belum memenuhi syarat dilakukan perancangan ulang pada kolom. Pada perancangan ulang ditetapkan diameter dan tinggi kolom, sedangkan laju minimum air dilakukan penyesuaian agar kadar  $\text{H}_2\text{S}$  keluaran sebesar 4 ppm.

Setelah didapatkan jenis *wet scrubber* yang tepat kemudian dilakukan analisis yang kedua, yaitu analisis pengaruh kinerja *wet scrubber* terhadap perubahan laju alir biogas. Laju alir biogas produksi PT Enero mengalami fluktuasi yang bergantung pada kondisi lingkungan, sehingga diprediksi kinerja *wet scrubber* akan terpengaruh. Oleh sebab itu laju alir biogas akan divariasikan sebagai parameter input yang masuk *wet scrubber* dan dianalisis terhadap kemampuan *wet scrubber* dalam mengabsorpsi  $\text{H}_2\text{S}$ . Variasi parameter proses disesuaikan berdasarkan kondisi yang terjadi di lapangan. Setelah diketahui pengaruhnya terhadap proses absorpsi terutama terhadap kadar  $\text{H}_2\text{S}$  keluaran *wet scrubber*, langkah selanjutnya adalah melakukan penyesuaian jumlah air yang masuk *wet scrubber* agar kadar  $\text{H}_2\text{S}$  keluaran sebesar 4 ppm.

## BAB IV

### ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perancangan *wet scrubber* yang telah dilakukan secara manual akan disimulasikan menggunakan *software* Aspen Plus V8.4. Hasil simulasi akan dianalisis meliputi 2 tahap yaitu analisis kinerja *wet scrubber* dengan laju alir biogas tetap dan analisis kinerja *wet scrubber* dengan laju alir biogas yang berubah. Kinerja utama *wet scrubber* yang menjadi acuan adalah kemampuan *wet scrubber* untuk menghasilkan gas  $H_2S$  keluaran sebesar 4 ppm. Kedua analisis dilakukan untuk mengetahui kinerja *wet scrubber* sesuai dengan kondisi di lapangan, yaitu kondisi operasi normal dan kondisi saat terjadi fluktuasi biogas hasil produksi. Analisis pertama bertujuan untuk mengetahui perbandingan kinerja dari jenis kolom yang digunakan yaitu kolom *tray* dan *packed* dengan laju alir biogas tetap. Analisis kedua bertujuan untuk mengetahui kinerja *wet scrubber* terhadap perubahan laju alir biogas.

#### 4.1 Analisis Kinerja Wet Scrubber dengan Laju Alir Biogas Tetap

Pada sub bab ini akan dilakukan analisis ini dilakukan hasil perancangan kolom *tray* dan *packed*. Analisis ini bertujuan agar dapat menentukan jenis kolom yang tepat digunakan sebagai *wet scrubber*. Karakteristik biogas yang digunakan berasal dari biogas hasil produksi PT Enero dengan tidak terjadi perubahan pada karakteristiknya. Berikut adalah spesifikasi *packing* yang digunakan pada *wet scrubber* jenis *packed*.

**Tabel 4.1** Spesifikasi *Packing* pada *Wet Scrubber* Jenis *Packed*

Jenis <i>Packing</i>	Material	Ukuran	Surface Area, $a$ ( $m^2/m^3$ )	Voids, $\varepsilon$ (%)
Pall Ring	Plastik	25 mm	207	90
Pall Ring	Plastik	38 mm	128	91
Pall Ring	Plastik	50 mm	102	92
ISP	Logam	2T	215	98

#### 4.1.1 Struktur Bangun *Wet Scrubber* Kolom *Tray* dan *Packed* Hasil Perancangan

*Wet scrubber* yang telah dirancang merupakan jenis kolom *tray* dan *packed*. Perbandingan kedua kolom tersebut berdasarkan struktur bangunnya ditunjukkan dalam tabel berikut:

**Tabel 4.2** Struktur Bangun Kolom *Tray* dan *Packed* Hasil Perancangan

Jenis Kolom		Parameter	
		Diameter (m)	Tinggi (m)
<i>Tray</i>		1,5	9
<i>Packed</i>	Pall Ring (25 mm)	1,5	6,07
	Pall Ring (38 mm)	1,5	7,90
	Pall Ring (50 mm)	1,5	10,28
	ISP	1,5	5,39

Secara keseluruhan kolom *packed* memiliki tinggi kolom yang lebih kecil dibandingkan dengan kolom *tray*. Kolom dengan jenis *packing* Pall Ring (50 mm) memiliki tinggi paling besar dibanding semua jenis kolom baik *tray* maupun *packed*, hal ini berarti volume *packing* yang dibutuhkan besar sehingga jumlah unit *packing* yang dibutuhkan untuk memenuhi kolom juga lebih banyak.

#### 4.1.2 Kinerja *Wet Scrubber* Kolom *Tray* dan *Packed* Hasil Perancangan

Analisis kinerja dilakukan dengan menggunakan *software* Aspen Plus. Parameter perancangan seperti struktur bangun kolom dan laju alir air yang telah dihitung sebelumnya digunakan sebagai masukan data.

##### a. *Pressure Drop* Kolom *Tray* dan *Packed*

Nilai *pressure drop* untuk masing-masing jenis kolom hasil rancangan ditunjukkan pada tabel berikut:



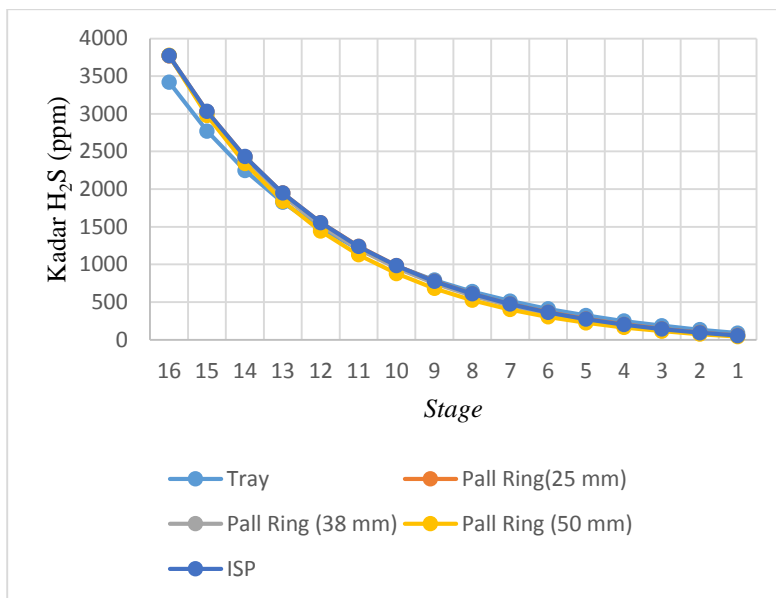
**Tabel 4.3** Nilai *Pressure Drop* pada Kolom Hasil Perancangan

Jenis Kolom		$\Delta P$ Total <i>Pressure Drop</i> (bar)
<i>Tray</i>		0,2016
<i>Packed</i>	Pall Ring (25 mm)	$2,34 \cdot 10^{-4}$
	Pall Ring (38 mm)	$1,89 \cdot 10^{-4}$
	Pall Ring (50 mm)	$1,29 \cdot 10^{-4}$
	ISP	$4,55 \cdot 10^{-5}$

Nilai *pressure drop* menunjukkan seberapa besar hambatan yang harus dilalui aliran gas melalui kolom. Pada tabel terlihat bahwa nilai *pressure drop* kolom *tray* lebih besar daripada kolom *packed*, hal ini disebabkan karena pada kolom *tray* gas harus melalui 2 macam hambatan yaitu gesekan dengan lubang *tray* dan hambatan akibat massa air yang harus ditembus oleh gas melalui *tray*. Kolom *packed* mempunyai *pressure drop* yang lebih kecil sebab aliran gas bersifat kontinyu karena gas dan larutan air hanya saling berkontak langsung melalui sela-sela ruang antar *packing*. Nilai *pressure drop* kolom *packed* tidak jauh berbeda namun pada kolom Intalox Structured *Packing* (ISP) memiliki *pressure drop* yang lebih kecil dibandingkan dengan jenis *packing* lainnya, hal ini disebabkan karena ruang kosong antar *packing* yang lebih besar. Ruang kosong yang lebih besar memungkinkan aliran air lebih lancar sehingga hambatan gas akibat massa air lebih kecil, ruang kosong ini ditunjukkan oleh nilai *voids*, dimana ISP memiliki *voids* paling besar yaitu 98.

#### **b. Profil Kadar $H_2S$ Kolom *Tray* dan *Packed***

Profil kadar  $H_2S$  untuk masing-masing jenis kolom hasil rancangan ditunjukkan pada gambar berikut:



**Gambar 4.1** Profil Kadar  $H_2S$  pada *Wet Scrubber* Hasil Perancangan

Penomoran *stage* pada gambar di atas berawal dari atas kolom. *Stage 1* merupakan *stage* puncak atau tempat keluaran gas dan *stage 16* merupakan *stage* terbawah atau tempat masukan gas. Tampak dari grafik bahwa masing-masing rancangan kolom baik *tray* maupun *packed* memiliki performa yang hampir sama dalam proses absorpsi gas  $H_2S$  oleh air. Namun terlihat bahwa kolom *tray* pada *stage 16* sampai *stage 14* kadar  $H_2S$  dalam gas lebih kecil dibandingkan kolom *packed*. Hal tersebut terjadi dipengaruhi salah satunya akibat *pressure drop* yang lebih besar pada kolom *tray*. *Pressure drop* yang besar pada *tray* memiliki arti usaha gas lebih besar untuk menembus massa air (*liquid hold-up*) yang terdapat di masing-masing *tray*. Akibatnya kontak antara gas dengan air lebih lama sehingga  $H_2S$  lebih banyak terabsorpsi oleh air. Hal ini berbeda dengan kolom *packed* dimana aliran gas dan air bersifat kontinyu melalui sela-sela *packing*. Absorpsi  $H_2S$  pada kolom

*packed* terjadi karena gas dan air mengalami kontak langsung melalui permukaan *packing* yang besar.

**c. Kadar  $H_2S$  pada Gas Keluaran Kolom Tray dan Packed**

Kadar  $H_2S$  pada gas keluaran untuk masing-masing jenis kolom hasil rancangan ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 4.4** Kadar  $H_2S$  pada Gas Keluaran Kolom Tray dan Packed Hasil Perancangan

Jenis Kolom		Kadar $H_2S$ (ppm)
Tray		88,29
Packed	Pall Ring (25 mm)	56,13
	Pall Ring (38 mm)	51,42
	Pall Ring (50 mm)	41,85
	ISP	54,77

Tabel di atas menunjukkan bahwa kadar  $H_2S$  pada kolom hasil rancangan baik jenis *tray* dan *packed* belum memenuhi syarat maksimum yaitu kurang dari 4 ppm. Hal ini terjadi salah satunya karena laju air yang kurang sehingga mengurangi penyerapan  $H_2S$  ke air. Pada kolom *tray* kadar  $H_2S$  lebih besar dibandingkan dengan kolom *packed* sehingga kolom *tray* tidak direkomendasikan sebagai *wet scrubber*. Hal tersebut diperkuat dengan *pressure drop* yang juga paling besar dibandingkan dengan kolom lain, *pressure drop* yang tinggi akan mengganggu kinerja kolom.

**d. Pembahasan Kinerja Kolom Tray dan Packed Hasil Perancangan**

Berdasarkan pemaparan sebelumnya diketahui bahwa kinerja *wet scrubber* baik kolom *tray* maupu *packed* belum memenuhi syarat yang ditetapkan yaitu kadar  $H_2S$  pada gas keluaran sebesar 4 ppm. Maka diperlukan perancangan ulang pada kolom. Kolom yang dilakukan perancangan ulang merupakan kolom *packed*, sebab pada kolom *tray* selain tidak menunjukkan performa yang diinginkan, secara konstruksi juga tidak ekonomis yang

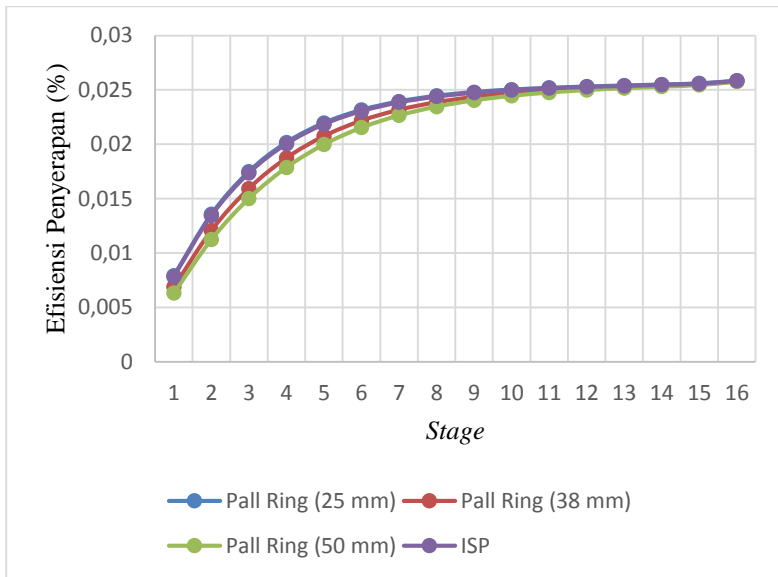
ditunjukkan tinggi kolom yang rata-rata lebih besar dibanding kolom *packed*. Dengan diameter kolom yang sama, maka tinggi kolom mempengaruhi besarnya kolom secara keseluruhan. Pada perancangan ulang ini diameter dan tinggi kolom ditetapkan, sedangkan laju alir air minimum sebagai variabel bebas. Laju air akan menyesuaikan hingga didapatkan kadar  $H_2S$  pada gas keluaran sebesar 4 ppm.

#### **4.1.3 Kinerja Wet Scrubber Kolom Packed Hasil Perancangan Ulang**

Perancangan ulang dilakukan pada kolom *packed* dengan diameter dan tinggi kolom ditetapkan sebesar 1,5 m dan 10 m. Jumlah *tray* teoritis/*stages* yang digunakan tetap sebanyak 16. Tujuan utama kolom yaitu menghasilkan  $H_2S$  dengan kadar 4 ppm dengan cara menyesuaikan jumlah air yang masuk. Simulasi tetap dilakukan di software Aspen Plus.

##### **a. Efisiensi Penyerapan Biogas pada Air**

Parameter kinerja ini menunjukkan kemampuan air untuk menyerap biogas. Semakin banyak biogas yang diserap oleh air maka efisiensi penyerapan semakin tinggi. Presentase efisiensi menunjukkan perbandingan antara jumlah mol gas terlarut dengan jumlah mol air. Efisiensi ditunjukkan pada setiap *stage/tray* teoritis. Grafik yang menunjukkan efisiensi penyerapan biogas pada air ditunjukkan pada gambar berikut:

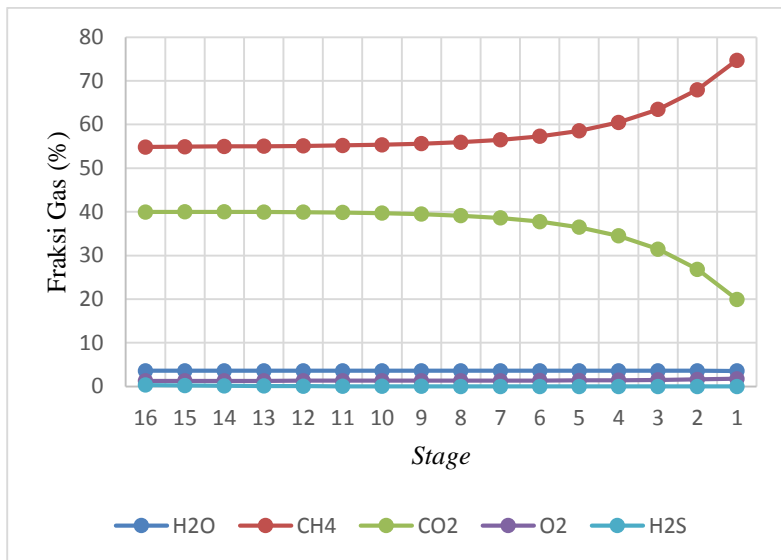


**Gambar 4.2** Profil Efisiensi Penyerapan Biogas ke Air Kolom *Packed*

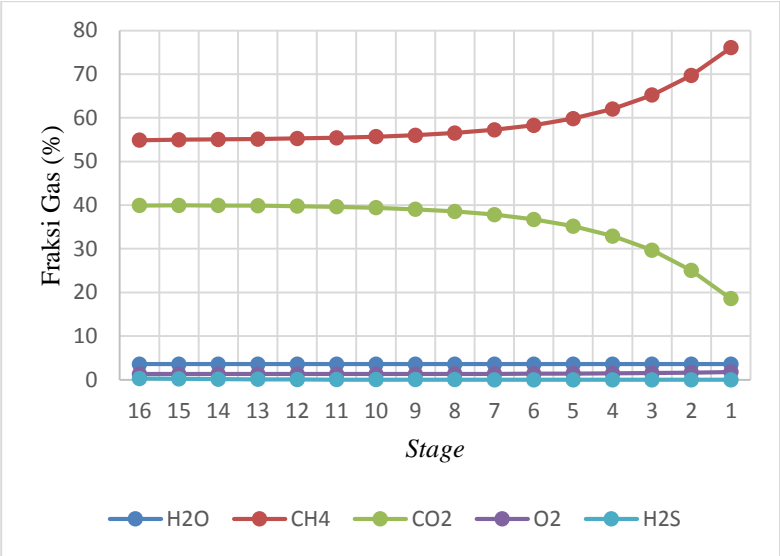
Terlihat bahwa dari atas ke bawah kolom terjadi kenaikan penyerapan biogas oleh air. Ini berarti bahwa semakin lama  $H_2S$  yang terserap juga semakin banyak. Air mengalir dari atas ke bawah kolom, air akan melakukan penyerapan gas untuk yang pertama kali pada atas kolom, lalu seiring dengan air yang melaju ke bawah kolom, air akan terus menerus melakukan kontak dengan gas, sehingga air akan kembali menyerap gas. Maka semakin ke bawah, air akan menjadi semakin jenuh oleh kadar gas yang terserap. Pada gambar di atas juga terlihat bahwa kolom dengan *packing* ISP dan Pall Ring 25 mm memiliki efisiensi penyerapan tertinggi, ini terjadi sebab kedua *packing* tersebut memiliki luas permukaan terbesar sehingga menyebabkan kontak antara air dan gas menjadi lebih besar.

### b. Perubahan Komposisi Biogas

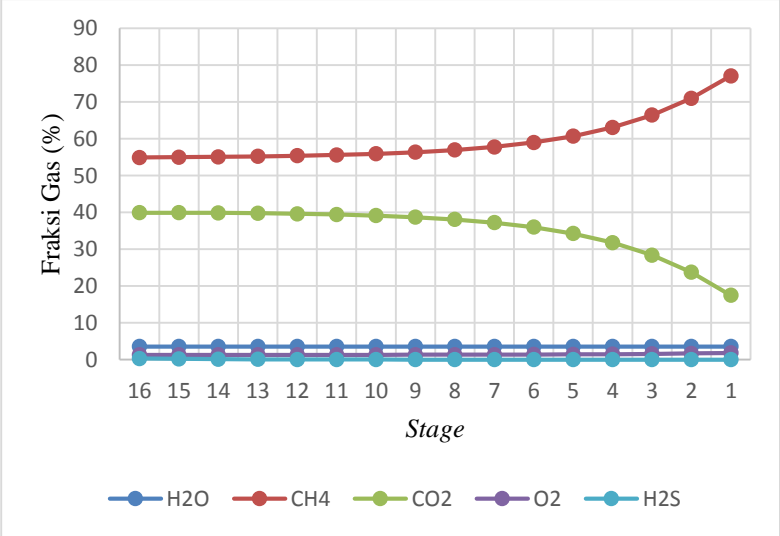
Selain gas  $\text{H}_2\text{S}$ , biogas PT Enero juga memiliki kadar lain yaitu gas metana ( $\text{CH}_4$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan oksigen ( $\text{O}_2$ ). Gas-gas tersebut juga mengalami kelarutan dalam air, namun yang membedakannya adalah gas-gas tersebut memiliki tingkat kelarutan yang lebih rendah daripada  $\text{H}_2\text{S}$ . Diantara gas tersebut karbon dioksida memiliki kelarutan yang cukup tinggi yaitu sekitar  $4,80 \cdot 10^{-4}$  mol  $\text{CO}_2$ /mol air pada suhu kamar. Sehingga dengan berkurangnya gas-gas dengan kelarutan tinggi seperti  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  akan menyebabkan presentase kadar gas lain seperti metana dan oksigen meningkat. Berikut adalah profil komposisi biogas di tiap *stage* pada masing-masing kolom:



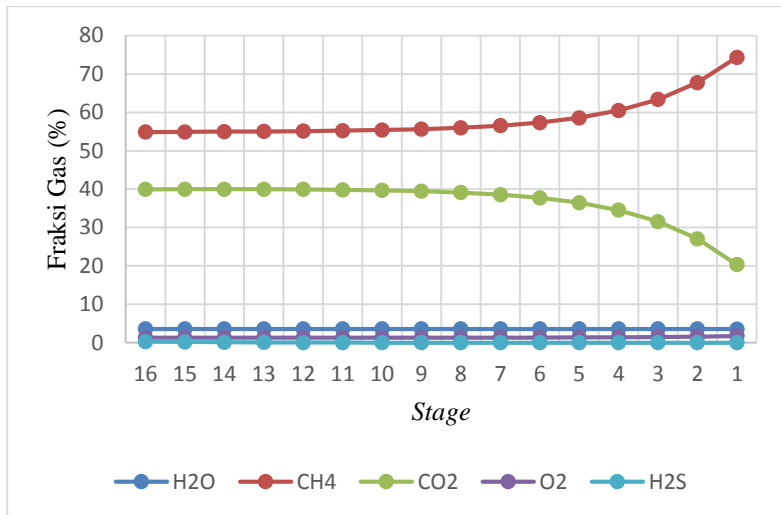
**Gambar 4.3** Profil Komposisi Biogas Kolom Pall Ring (25 mm)



Gambar 4.4 Profil Komposisi Biogas Kolom Pall Ring (38 mm)



Gambar 4.5 Profil Komposisi Biogas Kolom Pall Ring (50 mm)



**Gambar 4.6** Profil Komposisi Biogas Kolom Intalox Structured Packing

Terlihat pada grafik bahwa komposisi mengalami perubahan yang hampir sama pada semua kolom dengan jenis *packing* yang berbeda-beda. Yang cukup jelas terlihat adalah komposisi CH<sub>4</sub> meningkat, sedangkan CO<sub>2</sub> turun. Hal ini terjadi sebab kelarutan CO<sub>2</sub> lebih tinggi daripada CH<sub>4</sub> sehingga karena CO<sub>2</sub> terlarut lebih banyak ke air menyebabkan komposisi CH<sub>4</sub> terhadap seluruh gas meningkat. Gas H<sub>2</sub>S tidak berpengaruh banyak terhadap perubahan komposisi biogas, sebab komposisi H<sub>2</sub>S yang tidak besar dibandingkan dengan gas lain. Selain itu juga terjadi peningkatan O<sub>2</sub> walaupun tidak banyak. Air yang digunakan sebagai pelarut juga mengalami penguapan sehingga terdapat kadar uap air pada gas.

### c. Karakteristik Kinerja Kolom Packed Hasil Perancangan Ulang

Tabel 4.5 menunjukkan karakteristik kinerja dari kolom *packed* hasil perancangan ulang



**Tabel 4.5** Karakteristik Kinerja Kolom *Packed* Hasil Perancangan Ulang

Parameter	Pall Ring (25 mm)	Pall Ring (38 mm)	Pall Ring (50 mm)	Intalox Structured <i>Packing</i>
Komposisi Akhir CH <sub>4</sub>	74,72%	76,06%	77,13%	74,34%
Komposisi Akhir CO <sub>2</sub>	19,93%	18,57%	17,48%	20,33%
Komposisi Akhir O <sub>2</sub>	1,77%	1,80%	1,83%	1,76%
Komposisi Akhir H <sub>2</sub> S	4 ppm	4 ppm	4 ppm	4 ppm
Laju Air Minimum	182,48 m <sup>3</sup> /jam	191,31 m <sup>3</sup> /jam	198,18 m <sup>3</sup> /jam	179,99 m <sup>3</sup> /jam

Terlihat pada tabel di atas bahwa semakin luas permukaan *packing*, laju minimum air yang dibutuhkan agar kadar H<sub>2</sub>S mencapai 4 ppm semakin sedikit. Kolom dengan *packing* Intalox Structured *Packing* memiliki laju air minimum terkecil yaitu 179,99 m<sup>3</sup>/jam dengan luas permukaan *packing* terbesar yaitu 215 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Hal ini dikarenakan semakin luas permukaan *packing* kontak antara gas dengan air semakin tinggi sehingga H<sub>2</sub>S yang terlarut juga semakin cepat akibatnya air yang diperlukan semakin sedikit. Namun dengan laju air yang sedikit juga menyebabkan kadar gas lain yang terlarut juga semakin sedikit. Maka kolom ISP mempunyai komposisi CO<sub>2</sub> paling besar dibandingkan dengan kolom jenis lain. Jumlah CO<sub>2</sub> yang terserap sangat mempengaruhi komposisi gas lain, semakin tinggi gas CO<sub>2</sub> yang terserap maka komposisi gas lain meningkat. Terjadinya perbedaan komposisi gas, sebab komposisi gas dihitung berdasarkan perbandingan jumlah gas tersebut dengan seluruh gas.

Maka berdasarkan data-data di atas dan mempertimbangkan bahwa tujuan utama perancangan adalah mendapatkan kadar H<sub>2</sub>S sebesar 4 ppm, maka kolom dengan laju air minimum paling kecil yang dipilih. Semakin sedikit air yang diperlukan maka semakin

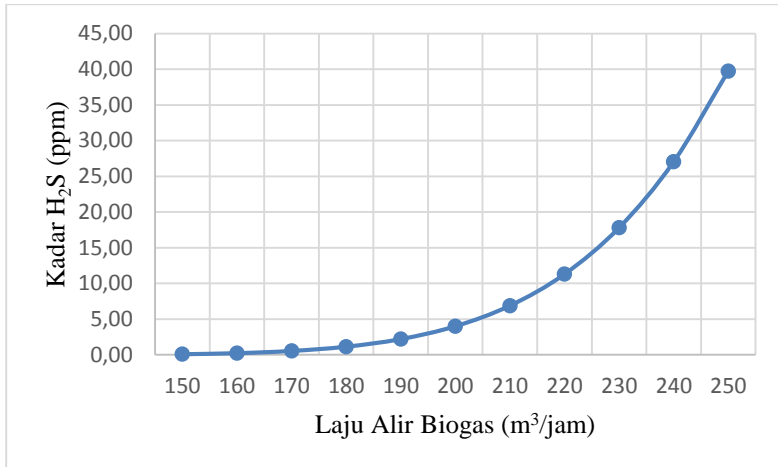
murah biaya operasionalnya. Sehingga kolom dengan *packing* Intalox Structured *Packing* tepat digunakan sebagai pengisi pada kolom. Namun yang juga harus menjadi pertimbangan adalah harga *packing*, ISP merupakan *packing* jenis *stuctured packing* sehingga akan lebih mahal daripada Pall Ring yang merupakan *random packing*. Maka untuk *random packing*, Pall Ring 25 mm tepat digunakan sebagai pengisi kolom sebab memiliki laju air minim paling kecil dibandingkan *random packing* lainnya.

## **4.2 Analisis Kinerja *Wet Scrubber* dengan Laju Alir Biogas yang Berubah**

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari perubahan laju alir biogas terhadap proses absorpsi di *wet scrubber*, dimana akan berpengaruh pada kadar  $H_2S$  keluaran *wet scrubber*. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kadar  $H_2S$  pada gas sebesar 4 ppm, sehingga akan dilakukan penyesuaian jumlah air yang masuk berdasarkan perubahan laju alir biogas agar kadar  $H_2S$  keluaran *wet scrubber* sebesar 4 ppm. Variasi dari laju alir biogas ini didasarkan pada fluktuasi produksi biogas di lapangan. *Wet scrubber* yang digunakan adalah jenis kolom *packed* dengan *packing* Intalox Structured *Packing*, yang mana merupakan *wet scrubber* pilihan berdasarkan pada analisis sebelumnya.

### **4.2.1 Pengaruh Perubahan Laju Alir Biogas terhadap Kemampuan Absorpsi $H_2S$ *Wet Scrubber***

Laju alir rata-rata biogas dari lagoon adalah  $200 \text{ m}^3/\text{jam}$ , dengan fluktuasi laju alir sebesar  $150 - 250 \text{ m}^3/\text{jam}$ . Sehingga dilakukan simulasi dengan variasi pada rentang laju alir tersebut dan diamati pengaruhnya terhadap kemampuan absorpsi  $H_2S$ . Laju air masukan *wet scrubber* pada analisis ini dibuat tetap yang berdasarkan pada hasil desain sebelumnya dimana laju air ini sebenarnya digunakan agar mampu mengatasi gas masukan sebesar  $200 \text{ m}^3/\text{jam}$ . Adapun grafik perubahan terhadap kemampuan absorpsi  $H_2S$  *wet scrubber* ditunjukkan pada gambar berikut:



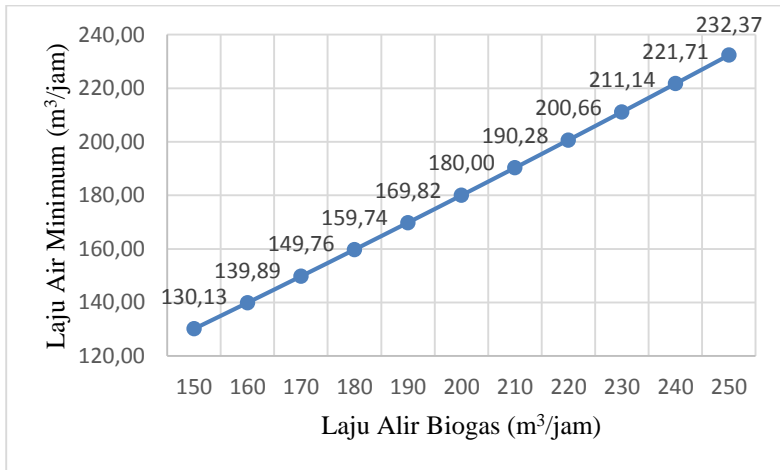
**Gambar 4.7** Pengaruh Laju Alir Biogas terhadap Kadar  $\text{H}_2\text{S}$  pada Gas Keluaran *Wet Scrubber*

Terlihat pada gambar 4.7 bahwa semakin rendah laju alir biogas dari kondisi normalnya yaitu  $200 \text{ m}^3/\text{jam}$ , kadar  $\text{H}_2\text{S}$  pada biogas juga turut semakin rendah, sebaliknya semakin tinggi laju alir biogas maka kadar  $\text{H}_2\text{S}$  juga semakin tinggi. Hal ini juga berarti bahwa semakin tinggi laju biogas yang masuk *wet scrubber*,  $\text{H}_2\text{S}$  yang terlarut dalam air semakin banyak. Peristiwa ini bisa dijelaskan melalui persamaan 2.12 bahwa nilai koefisien transfer massa bergantung pada laju gas, semakin besar laju gas maka koefisien transfer massa juga semakin besar, akibatnya perpindahan massa gas ke air juga semakin besar yang berarti bahwa gas yang terlarut semakin banyak. Hal ini juga sesuai dengan teori bahwa semakin besar kontak antara gas dan air, yang ditunjukkan dengan laju gas yang besar, maka kemungkinan gas yang akan terdifusi ke dalam air juga akan semakin banyak.

#### 4.2.2 Penyesuaian Laju Air Masukan *Wet Scrubber* terhadap Perubahan Laju Alir Biogas

Berdasarkan analisis sebelumnya bisa diambil kesimpulan bahwa apabila terjadi fluktuasi pada laju gas masukan ke *wet*

*scrubber*, maka *wet scrubber* tidak mampu menghasilkan kadar  $H_2S$  sebesar 4 ppm. Maka perlu dilakukan penyesuaian terhadap desain *wet scrubber* yaitu dengan mengubah laju air masukan sehingga kadar  $H_2S$  tetap terjaga sebesar 4 ppm. Grafik penyesuaian jumlah air masukan terhadap perubahan laju alir biogas ditunjukkan pada gambar berikut:



**Gambar 4.8** Penyesuaian Laju Air Masukan *Wet Scrubber* terhadap Perubahan Laju Alir Biogas

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa terjadi kesesuaian antara laju alir biogas yang masuk dengan laju air minimum yang diperlukan. Semakin tinggi laju alir biogas maka laju air minimum yang diperlukan juga semakin tinggi, dimana diperlukan laju air sebesar  $130,13 \text{ m}^3/jam$  untuk mengatasi fluktuasi laju biogas terendah yaitu sebesar  $150 \text{ m}^3/jam$  dan laju air sebesar  $232,37 \text{ m}^3/jam$  untuk mengatasi fluktuasi laju biogas tertinggi yaitu sebesar  $250 \text{ m}^3/jam$ .

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- *Wet scrubber* hasil perancangan mampu menghasilkan kadar  $H_2S$  gas keluaran kolom sebesar 4 ppm. Spesifikasi *wet scrubber* adalah sebagai berikut:

Jenis <i>Wet Scrubber</i>	: <i>Packed</i>
Jenis <i>Packing</i>	: Intalox Structured Packing
Diameter	: 1,5 m
Tinggi	: 10 m
Laju Alir Air Minimum	: 179,99 m <sup>3</sup> /jam

- Fluktuasi laju biogas yang masuk berpengaruh terhadap kinerja *wet scrubber*, semakin tinggi laju biogas mengakibatkan kadar  $H_2S$  pada gas keluaran *wet scrubber* meningkat
- Kadar  $H_2S$  yang berubah akibat fluktuasi laju biogas bisa diatasi yaitu dengan menyesuaikan laju air minimum, semakin besar laju biogas, laju air minimum yang diperlukan semakin besar, dimana diperlukan laju air sebesar 130,13 m<sup>3</sup>/jam untuk mengatasi fluktuasi laju biogas terendah yaitu sebesar 150 m<sup>3</sup>/jam dan laju air sebesar 232,37 m<sup>3</sup>/jam untuk mengatasi fluktuasi laju biogas tertinggi yaitu sebesar 250 m<sup>3</sup>/jam.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat dilakukan untuk peningkatan kualitas tugas akhir selanjutnya yaitu:

- Diperlukan validasi hasil perancangan pada Aspen Plus dengan kondisi riil di lapangan agar hasil perancangan mampu diterapkan pada plant

- Diperlukan studi tentang sistem pengendalian yang dapat diterapkan pada *wet scrubber* agar dapat mengatasi fluktuasi biogas

## DAFTAR PUSTAKA

- Arachchige, U.S.P.R. dan Melaanen, M.C. 2012. "Selection of Packing Material for Gas Absorption". **European Journal of Scientific Research**, 87(1):117-126
- Bravo, J.L. dan Fair, J.R. 1982. "Generalized correlation for mass transfer in packed distillation columns". **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, 21(1):162-170
- Chan, H. dan Fair, J.R. 1984. "Prediction of Point Efficiencies on Sieve Trays. 1. Binary Systems". **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, 23 (4):820-827
- Chattopadhyay, P. 2007. **Absorption and Stripping**. New Delhi: Asian Books Pvt. Ltd
- Clever, H.L. dan Young, C.L. 1987. **IUPAC Solubility Data Series, Vol. 27/28, Methane**. Oxford: Pergamon Press
- Dolan, M. J. 1982. **Norton Company Engineering Department Internal Report**
- Eden, M.R. 2012. **Introduction to Aspen Plus Simulation**. Chemical Engineering Department, Auburn University
- Fogg, P.G.T. dan Young, C.L. 1988. **IUPAC Solubility Data Series, Vol. 32, Hydrogen Sulfide, Deuterium Sulfide, and Hydrogen Selenide**. Oxford: Pergamon Press
- Ghanbarabadi, G. dan Khoshandam, B., 2015. "Simulation and comparison of sulfinol solvent performance with Amine solvents in removing sulfur compounds and acid gases from natural sour gas". **J. Nat. Gas. Sci. Eng.**, 22:415-420
- Koch-Glitch. 2010. "Plastic Random Packing". **Bulletin KGPP-1. Rev. 3**
- Koch-Glitch. 2015. "Structured Packing". **Bulletin KGSP-2. Rev. 4**
- Lien, C.C., Lin, J.L., dan Ting, C.H. 2014. "Water Scrubbing for Removal of Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S) Inbiogas from Hog Farms". **Journal of Agricultural Chemistry and Environment**, 3(2B):1-6

- Lin, E.S. 2004. "A Modelling Study of H<sub>2</sub>S Absorption in Pure Water and in Rainwater". **Master Thesis, National University of Singapore**
- Muhammad, A. dan GadelHak, Y. 2014. "Correlating the additional amine sweetening cost to acid gases load in natural gas using Aspen Hysys". **J. Nat. Gas Sci. Eng.**, 17:119-130
- Perry, R.H dan Green, D.W. 1997. **Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6th ed.** New York: McGraw-Hill
- PT Enero. 2016. **Proses Produksi Bioethanol dan Biogas**
- Sulaiman, F. 2008. **Absorpsi**. Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
- Striggle, R.F. 1994. **Packed Tower Design and Applications: Random and Structure Packing**. Houston: Gulf Publishing Company
- Walt, V. 2011. **Solubility of gases in liquids**. <URL:<http://www.800mainstreet.com/9/0009-006-henry.html>>
- Wilson, I.D. 2004. "Gas-Liquid Contact Area of Random and Structured Packing". **Master Thesis, University of Texas, USA**



## **LAMPIRAN A**

*Stream Result* Hasil Simulasi Aspen  
Plus terhadap Perancangan *Wet*  
*Scrubber*



**A.1 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan *Wet Scrubber* Jenis Kolom Tray

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	0,912	1,114
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	8420,13	9,042	6,972	8422,188
Mass Flow kg/hr	151691	252,472	158,272	151785,2
Volume Flow cum/hr	152,203	200	190,339	152,377
Enthalpy Gcal/hr	-574,891	-0,442	-0,253	-575,079
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	151691		4,955	151685,6
CH4		82,293	80,299	1,995
CO2		164,391	69,207	94,643
O2		3,877	3,79	0,087
H2S		1,911	0,021	1,887
H3O+	< 0,001			0,235
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,002
HCO3-				0,75
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H2O	8420,13		0,275	8419,83
CH4		5,13	5,005	0,124
CO2		3,735	1,573	2,151
O2		0,121	0,118	0,003
H2S		0,056	0,001	0,055
H3O+	< 0,001			0,012
OH-	< 0,001			trace
HS-				< 0,001
HCO3-				0,012
S--				trace
CO3--				trace

**A.2 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed* dengan *Packing* Pall Ring 25 mm

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	1,013	1,013
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	8420,13	9,042	7,126	8422,034
Mass Flow kg/hr	151691	252,472	165,24	151778,2
Volume Flow cum/hr	152,203	200	175,056	152,363
Enthalpy Gcal/hr	-574,891	-0,442	-0,268	-575,065
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	151691		4,585	151686
CH4		82,293	80,508	1,785
CO2		164,391	76,335	87,537
O2		3,877	3,8	0,078
H2S		1,911	0,014	1,894
H3O+	< 0,001			0,226
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,003
HCO3-				0,72
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H2O	8420,13		0,254	8419,852
CH4		5,13	5,018	0,111
CO2		3,735	1,734	1,989
O2		0,121	0,119	0,002
H2S		0,056	< 0,001	0,056
H3O+	< 0,001			0,012
OH-	< 0,001			trace
HS-				< 0,001
HCO3-				0,012
S--				trace
CO3--				trace

**A.3 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed* dengan *Packing* Pall Ring 38 mm

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	1,013	1,013
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	8420,13	9,042	7,126	8422,034
Mass Flow kg/hr	151691	252,472	165,219	151778,3
Volume Flow cum/hr	152,203	200	175,044	152,363
Enthalpy Gcal/hr	-574,891	-0,442	-0,267	-575,065
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	151691		4,583	151686
CH4		82,293	80,508	1,785
CO2		164,391	76,315	87,556
O2		3,877	3,8	0,078
H2S		1,911	0,012	1,896
H3O+	< 0,001			0,226
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,003
HCO3-				0,72
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H2O	8420,13		0,254	8419,852
CH4		5,13	5,018	0,111
CO2		3,735	1,734	1,989
O2		0,121	0,119	0,002
H2S		0,056	< 0,001	0,056
H3O+	< 0,001			0,012
OH-	< 0,001			trace
HS-				< 0,001
HCO3-				0,012
S--				trace
CO3--				trace



**A.4 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed* dengan *Packing* Pall Ring 50 mm

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	1,013	1,013
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	8420,13	9,042	7,125	8422,035
Mass Flow kg/hr	151691	252,47 2	165,19	151778,3
Volume Flow cum/hr	152,203	200	175,028	152,363
Enthalpy Gcal/hr	-574,891	-0,442	-0,267	-575,065
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	151691		4,582	151686
CH4		82,293	80,509	1,784
CO2		164,39 1	76,29	87,581
O2		3,877	3,8	0,078
H2S		1,911	0,01	1,898
H3O+	< 0,001			0,226
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,003
HCO3-				0,72
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H <sub>2</sub> O	8420,13		0,254	8419,852
CH <sub>4</sub>		5,13	5,018	0,111
CO <sub>2</sub>		3,735	1,733	1,99
O <sub>2</sub>		0,121	0,119	0,002
H <sub>2</sub> S		0,056	< 0,001	0,056
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	< 0,001			0,012
OH <sup>-</sup>	< 0,001			trace
HS <sup>-</sup>				< 0,001
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				0,012
S <sup>--</sup>				trace
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>				trace

**A.5 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed* dengan *Packing* Intalox Structured Packing

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	1,013	1,013
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	8420,13	9,042	7,128	8422,032
Mass Flow kg/hr	151691	252,47 2	165,303	151778,2
Volume Flow cum/hr	152,203	200	175,093	152,363
Enthalpy Gcal/hr	-574,891	-0,442	-0,268	-575,065
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	151691		4,59	151686
CH4		82,293	80,508	1,786
CO2		164,39 1	76,392	87,479
O2		3,877	3,799	0,078
H2S		1,911	0,013	1,895
H3O+	< 0,001			0,226
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,003
HCO3-				0,72
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H2O	8420,13		0,255	8419,852
CH4		5,13	5,018	0,111
CO2		3,735	1,736	1,988
O2		0,121	0,119	0,002
H2S		0,056	< 0,001	0,056
H3O+	< 0,001			0,012
OH-	< 0,001			trace
HS-				< 0,001
HCO3-				0,012
S--				trace
CO3--				trace

## **LAMPIRAN B**

*Stream Result* Hasil Simulasi Aspen  
Plus terhadap Perancangan Ulang *Wet*  
*Scrubber*



**B.1 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan Ulang *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed* dengan *Packing Pall Ring 25 mm*

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	1,013	1,014
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	10095,1 3	9,042	6,686	10097,47
Mass Flow kg/hr	181866, 6	252,47 2	146,898	181972,2
Volume Flow cum/hr	182,481	200	164,26	182,675
Enthalpy Gcal/hr	-689,253	-0,442	-0,228	-689,466
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	181866, 6		4,303	181861,8
CH4		82,293	80,152	2,142
CO2		164,39 1	58,659	105,109
O2		3,877	3,784	0,093
H2S		1,911	0,001	1,907
H3O+	< 0,001			0,271
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,003
HCO3-				0,864
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H <sub>2</sub> O	10095,1 3		0,239	10094,86
CH <sub>4</sub>		5,13	4,996	0,134
CO <sub>2</sub>		3,735	1,333	2,388
O <sub>2</sub>		0,121	0,118	0,003
H <sub>2</sub> S		0,056	< 0,001	0,056
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	< 0,001			0,014
OH <sup>-</sup>	< 0,001			trace
HS <sup>-</sup>				< 0,001
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				0,014
S <sup>--</sup>				trace
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>				trace



**B.2 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan Ulang Wet Scrubber Jenis Kolom Packed dengan Packing Pall Ring 38 mm

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	1,013	1,014
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	10583,8	9,042	6,56	10586,26
Mass Flow kg/hr	190670	252,472	141,663	190780,8
Volume Flow cum/hr	191,314	200	161,173	191,518
Enthalpy Gcal/hr	-722,616	-0,442	-0,217	-722,841
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	190670		4,22	190665,3
CH4		82,293	80,047	2,246
CO2		164,391	53,616	110,121
O2		3,877	3,779	0,098
H2S		1,911	0,001	1,907
H3O+	< 0,001			0,284
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,003
HCO3-				0,906
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H2O	10583,8		0,234	10583,53
CH4		5,13	4,99	0,14
CO2		3,735	1,218	2,502
O2		0,121	0,118	0,003
H2S		0,056	< 0,001	0,056
H3O+	< 0,001			0,015
OH-	< 0,001			trace
HS-				< 0,001
HCO3-				0,015
S--				trace
CO3--				trace

**B.3 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan Ulang *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed* dengan *Packing* Pall Ring 50 mm

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	1,013	1,013
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	10963,6	9,042	6,463	10966,17
Mass Flow kg/hr	197512, 4	252,47 2	137,615	197627,2
Volume Flow cum/hr	198,18	200	158,785	198,391
Enthalpy Gcal/hr	-748,548	-0,442	-0,209	-748,781
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	197512, 4		4,155	197507,7
CH4		82,293	79,965	2,328
CO2		164,39 1	49,718	113,996
O2		3,877	3,776	0,101
H2S		1,911	0,001	1,907
H3O+	< 0,001			0,294
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,003
HCO3-				0,938
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H2O	10963,6		0,231	10963,34
CH4		5,13	4,985	0,145
CO2		3,735	1,13	2,59
O2		0,121	0,118	0,003
H2S		0,056	< 0,001	0,056
H3O+	< 0,001			0,015
OH-	< 0,001			trace
HS-				< 0,001
HCO3-				0,015
S--				trace
CO3--				trace

**B.4 Stream Result** Hasil Simulasi Aspen Plus terhadap Perancangan Ulang *Wet Scrubber* Jenis Kolom *Packed* dengan *Packing* Intalox Structured Packing

	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
Temperature C	27	47	27	27,1
Pressure bar	1,013	1,2	1,013	1,013
Vapor Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Mole Flow kmol/hr	9957,73 5	9,042	6,724	9960,04
Mass Flow kg/hr	179391, 4	252,47 2	148,454	179495,4
Volume Flow cum/hr	179,997	200	165,177	180,188
Enthalpy Gcal/hr	-679,872	-0,442	-0,232	-680,082
<b>Mass Flow kg/hr</b>				
H2O	179391, 4		4,33	179386,6
CH4		82,293	80,182	2,112
CO2		164,39 1	60,156	103,62
O2		3,877	3,785	0,092
H2S		1,911	0,001	1,907
H3O+	< 0,001			0,267
OH-	< 0,001			trace
HS-				0,003
HCO3-				0,852
S--				trace
CO3--				trace

<b>Mole Flow kmol/hr</b>	<b>WATIN</b>	<b>GASIN</b>	<b>GASOUT</b>	<b>WATOUT</b>
H2O	9957,735		0,24	9957,467
CH4		5,13	4,998	0,132
CO2		3,735	1,367	2,354
O2		0,121	0,118	0,003
H2S		0,056	< 0,001	0,056
H3O+	< 0,001			0,014
OH-	< 0,001			trace
HS-				< 0,001
HCO3-				0,014
S--				trace
CO3--				trace



## **BIODATA PENULIS**

Dilahirkan di Surabaya pada 11 Agustus 1993, penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar di SDN Barata Jaya (2000-2006), kemudian melanjutkan di SMPN 1 Surabaya (2006-2009) dan SMAN 5 Surabaya (2009-2012). Penulis diterima di jurusan Teknik Fisika FTI ITS pada tahun 2012. Pada kegiatan akademik, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Bahan. Pengalaman *internship* yang dimiliki penulis dilakukan di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Bidang studi dalam penyusunan tugas akhir yang diambil penulis adalah rekayasa instrumentasi dan kontrol.

Email : [vincensiuscd@yahoo.com](mailto:vincensiuscd@yahoo.com)